

# **SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA DE CONDIÇÕES DE EXPLORAÇÃO EM APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS**

O caso dos reforços de potência de  
Venda Nova

**RUI PEDRO SANTOS GASPAR RIBEIRO**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA**

---

Orientador: Professor Doutor Rodrigo Jorge Fonseca de Oliveira Maia

---

Coorientador EDP: Engenheiro Pedro Manuel Alves Neves Pinto

JUNHO DE 2016

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais

*Claro que há que romper barreiras.*

*Mas com que aríete?*

*Rosa Chacel*





## **AGRADECIMENTOS**

Por este trabalho tenho de agradecer o contributo do Engenheiro Pedro Pinto pela orientação e apoio fundamental na compreensão dos problemas encontrados e por todo o conhecimento que me transmitiu durante o período de estágio. Acima de tudo pela boa disposição com que sempre abordou os problemas que fui encontrando.

A todo o departamento de hidráulica da direção de barragens da EDP Produção pela fácil adaptação ao local de estágio, pela pronta disponibilidade para qualquer pedido meu e acima de tudo pelo modelo de bons trabalhadores e colegas que representam. Agradeço pela oportunidade de visitar algumas das maiores obras de engenharia do país e de os acompanhar no trabalho de campo, o que tornou o período de estágio rico em aprendizagem.

Ao professor Doutor Rodrigo Maia pela paciência e compreensão das minhas limitações e pelo esforço que teve em me manter focado no rumo correto para a concretização de um bom trabalho.

À minha família pelo apoio condicional durante todo o percurso académico, sobretudo aos meus pais pelos sacrifícios que fizeram para que nada me faltasse.

Aos meus amigos pela companhia, conselhos e discussões que me permitem evoluir o conhecimento mas sobretudo como pessoa.



## RESUMO

A procura pela maior eficiência energética e as exigências decorrentes do Mercado Ibérico de Eletricidade obrigam a desenvolver soluções para produção de eletricidade cada vez mais flexíveis. No caso de aproveitamentos hidroelétricos, o uso de grupos reversíveis é cada vez mais frequente nos novos aproveitamentos hidroelétricos e reforços de potência, permitindo aumentar a flexibilidade de produção de energia. São exemplos de aproveitamentos hidroelétricos equipados com grupos reversíveis os reforços de potência de Venda Nova II e Venda Nova III.

As duas estruturas de restituição destes reforços de potência encontram-se muito próximas uma da outra, implantadas num canal cujas dimensões estão constrangidas pela dimensão do vale do rio Rabagão onde está inserido. No projeto de Venda Nova III previam-se operações conjuntas de turbinamento ou bombagem nos dois reforços de potência. No entanto, após a fase de projeto do aproveitamento de Venda Nova III, foi equacionada a hipótese de funcionamento de uma das centrais em turbinamento e da outra em bombagem, em simultâneo, de modo a majorar a flexibilização da exploração dos aproveitamentos. Este modo de funcionamento irá provocar escoamentos complexos no canal onde se inserem as restituições que necessitam de ser estudados para apurar a existência de fatores limitadores à exploração do sistema.

Este trabalho visa o estudo hidrodinâmico de operações de turbinamento/bombagem no canal de restituição dos reforços de potência de Venda Nova, Venda Nova II e III, situados na cauda da albufeira da barragem de Salamonde.

O trabalho consiste na simulação de cenários de exploração dos dois aproveitamentos utilizando dois programas de cálculo que utilizam modelos numéricos bidimensionais e resolvem as equações definidoras do escoamento através de métodos de volumes finitos: o GUAD 2D e o IBER.

A estratégia do trabalho passa pela elaboração e refinamento de dois modelos representativos da mesma zona de estudo e pela calibração dos dois modelos, que é feita através da comparação dos resultados com os obtidos em modelo reduzido, realizados no âmbito do projeto do reforço de Potência de Venda Nova III no laboratório da Sogreah, em Grenoble.

A boa correlação de resultados de simulações de operações de turbinamento ou bombagem com os resultados dos estudos previamente elaborados confere confiança à simulação de cenários de operações de turbinamento e bombagem simultâneas. Os objetivos propostos de elaboração, calibração e aplicação a novos cenários foram alcançados, com os resultados obtidos a revelarem-se animadores na perspetiva da exploração dos aproveitamentos.

Complementarmente, foi aproveitado o facto de o *software* IBER permitir a simulação de transporte de sedimentos e de também se terem realizados ensaios em modelo reduzido com sedimentos. Mais uma vez, a calibração deste módulo é realizada com a comparação dos resultados obtidos nos tais ensaios em modelo reduzido, o que permite a aplicação do modelo computacional criado para operações de turbinamento e bombagem simultâneas e complementar os resultados obtidos em modelos puramente hidrodinâmicos.

Desta análise, os objetivos de calibração e aplicação do modelo foram alcançados, conseguindo-se uma configuração que permite a simulação de um grande número de cenários de operações de turbinamento/bombagem.

**PALAVRAS-CHAVE:** MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA 2D, GUAD 2D, IBER, REFORÇOS DE POTÊNCIA DE VENDA NOVA, OPERAÇÕES SIMULTÂNEAS DE BOMBAGEM E TURBINAMENTO.

## **ABSTRACT**

The search for a greatest energy efficiency and the requirements of the Electricity Iberian Market demands the development of increasingly flexible solutions in the production phase. In the hydroelectric power plants case, the use of reversible groups is increasingly more frequent in the new hydroelectric power plants and power reinforcements, allowing the growth of energy production flexibility. Examples of hydroelectric developments equipped with reversible groups are the power reinforcements of Venda Nova II and Venda Nova III.

Both power reinforcement's restitution structures are located close to each other in a channel, whose dimensions are constrained by the Rabagão river valley, where it is inserted. The functioning of both power reinforcements predicted combined pumping or turbocharging operations. However, after the project phase of the Venda Nova III it was hypothesized the simultaneous turbocharging and pumping operations in both hydroelectric developments in order to flexibilize the exploitation of these developments. This working mode will cause complex flows in the channel where the restitution structures are located that need to be studied to determine the existence of limiting factors of the system exploration.

This report aims the hydrodynamic study of turbocharging/pumping operations in the restitution channel of the Venda Nova power reinforcements, Venda Nova II and III, located in the tail of the Salomonde dam reservoir.

This work consists in the simulation of exploration scenarios of both developments by using two calculation programs which use two-dimensional numerical models and solve the flow defining equations using finite volumes methods. GUAD 2D and IBER.

The strategy of this work consists in the elaboration, refinement of both models that represent the same study area and calibration of both models by comparing the results obtained in the numerical models with analogous results in the reduced physical models tests, performed in the project phase of the Venda Nova III power reinforcement, in the Sogreah laboratory, in Grenoble.

The good correlation of results allows the simulation of turbocharging or pumping operations, with the results previously obtained gives confidence to the simulation of simultaneous turbocharging and pumping operations. The proposed goals of elaboration, calibration and application to new scenarios were achieved, with the obtained results proving to be encouraging in the perspective of the power plants exploration on the named conditions.

Complementary, it was taken advantage the fact that the IBER software allows the simulation of sediment transport and also the fact that sediment transport studies were performed in reduced model. Once again, calibration of this module is done by comparing results obtained here with the analogous in the reduced model, which allows the application of the created model to simultaneous turbocharging and pumping operations and complement the results gathered in the purely hydrodynamic models used.

From this analysis, both model calibration and application goals were achieved, reaching a configuration that enables the simulation of a great number of scenarios of turbocharging/pumping simulations.

**KEYWORDS:** 2D HYDRODYNAMIC MODELLING, GUAD 2D, IBER, VENDA NOVA POWER REINFORCEMENTS, SIMULTANEOUS PUMPING AND TURBOCHARGING OPERATIONS.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	I
<b>RESUMO</b> .....	III
<b>ABSTRACT</b> .....	IV
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	5
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	6
<b>2. ESCOAMENTOS COM SUPERFÍCIE LIVRE</b> .....	7
2.1. TIPOS DE ESCOAMENTO .....	7
2.1.1. ESCOAMENTOS PERMANENTES .....	7
2.1.2. ESCOAMENTOS VARIÁVEIS .....	8
2.2. FORMULAÇÃO UNIDIMENSIONAL .....	9
2.3. FORMULAÇÃO BIDIMENSIONAL .....	11
2.4. MÉTODOS DE RESOLUÇÃO .....	12
2.5. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	14
<b>3. CASO DE ESTUDO</b> .....	17
3.1. LOCALIZAÇÃO E BREVE DESCRIÇÃO DA OBRA .....	17
3.2. BREVE DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO .....	18
3.2.1. TOMADA DE ÁGUA .....	19
3.2.2. TÚNEL DE ALIMENTAÇÃO EM CARGA .....	19
3.2.3. CENTRAL .....	20
3.2.4. TÚNEL DE RESTITUIÇÃO .....	21
3.2.5. RESTITUIÇÃO .....	21
3.2.6. TÚNEIS DE ACESSO E ATAQUE .....	22
3.2.7. ESTUDOS AMBIENTAIS .....	22
3.3. ENQUADRAMENTO DO ESTUDO A REALIZAR .....	22
3.4. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E HIDRÁULICA DA ZONA DE ESTUDO MODELAR .....	27
3.4.1. TOPOGRAFIA .....	27

3.4.2. RUGOSIDADE DO LEITO .....	29
3.4.3. NÍVEIS DE FUNCIONAMENTO .....	30
3.4.3.1. Albufeira de Venda Nova .....	30
3.4.3.2. Albufeira de Salamonde .....	30
3.4.4. CURVAS DE VAZÃO .....	30
3.4.5. DADOS PARA ANÁLISE DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	33

## **4. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO .....**

<b>4.1. ESTUDOS REALIZADOS E CONCLUSÕES RETIRADAS DOS RESULTADOS .....</b>	<b>35</b>
<b>4.2. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO .....</b>	<b>36</b>
4.2.1. PERAÇÕES DE TURBINAMENTO E BOMBAGEM .....	38
4.2.2. OPERAÇÕES DE TURBINAMENTO E BOMBAGEM EM SIMULTÂNEO .....	39
<b>4.3. CONDIÇÕES FRONTEIRA .....</b>	<b>41</b>
<b>4.4. CRITÉRIOS DE SIMULAÇÃO .....</b>	<b>42</b>

## **5. DEFINIÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO .....**

<b>5.1. CONCEÇÃO DO MODELO FÍSICO .....</b>	<b>43</b>
<b>5.2. DESCRIÇÃO DO SOFTWARE UTILIZADO .....</b>	<b>46</b>
5.2.1. MODELO GUAD 2D .....	46
5.2.2. MODELO IBER .....	49
<b>5.3. CALIBRAÇÃO DOS MODELOS .....</b>	<b>51</b>
5.3.1. ALTERAÇÕES DE DEFINIÇÃO EFETUADAS AO MODELO .....	52
5.3.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À DIMENSÃO DAS CÉLULAS DE CÁLCULO .....	57
5.3.2.1. Modelo GUAD 2D .....	57
5.3.2.2. Modelo IBER .....	58
5.3.2.3. Cenários de Comparação de resultados .....	59

## **6. ANÁLISE DE RESULTADOS .....**

<b>6.1. OPERAÇÕES DE TURBINAMENTO .....</b>	<b>69</b>
6.1.1. TURBINAMENTO EM VENDA NOVA III E TURBINAMENTO EM VENDA NOVA II .....	69
6.1.2. TURBINAMENTO EM VENDA NOVA III .....	70
<b>6.2. OPERAÇÕES DE BOMBAGEM .....</b>	<b>72</b>
6.2.1. BOMBAGEM EM VENDA NOVA III E BOMBAGEM EM VENDA NOVA II .....	72

6.2.2. BOMBAGEM EM VENDA NOVA III (2 GRUPOS) .....	74
6.2.3. BOMBAGEM EM VENDA NOVA III (1 GRUPO) .....	75
<b>6.3. OPERAÇÕES DE TURBINAMENTO E BOMBAGEM SIMULTÂNEAS .....</b>	<b>76</b>
6.3.1. TURBINAMENTO EM VENDA NOVA II E BOMBAGEM EM VENDA NOVA III.....	76
6.3.2. BOMBAGEM EM VENDA NOVA II E TURBINAMENTO EM VENDA NOVA III.....	81
 <b>7. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	 <b>87</b>
7.1. CONCLUSÕES.....	87
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	90





## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema dos aproveitamentos hidroelétricos de Venda Nova II e III (Ribeiro et al., 2014).....	2
Figura 2 – Volume de controlo e variáveis intervenientes .....	9
Figura 3 – Exemplo de uma malha triangular estruturada (obtida no programa IBER) .....	12
Figura 4 – Exemplo de uma malha não estruturada (Gonçalves, 2007) .....	13
Figura 5 – Localização do novo reforço de potência de Venda Nova III (Maia, 2015) .....	17
Figura 6 – Esquema do reforço de potência de Venda Nova III .....	19
Figura 7 – Vista de montante para o desarenador .....	20
Figura 8 – Restituição em turbinamento de Venda Nova III .....	22
Figura 9 – Vista de satélite da zona de estudo antes da demolição da ensecadeira 28-8-2013 (Google Earth Pro) .....	23
Figura 10 – Perda de energia na albufeira de Salamonde para as diferentes opções estudadas (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2009d).....	25
Figura 11 – Obras no leito do canal a 09-05-2011 (Ribeiro et al, 2014) .....	26
Figura 12 – Zona de estudo com ensecadeira provisória de jusante (EDP, 2014) .....	27
Figura 13 – Nuvem de pontos em formato 3D obtido pela ARTESCAN .....	28
Figura 14 – Topografia da zona de estudo: Zona de montante na parte superior e zona de jusante na parte inferior .....	29
Figura 15 – Curvas de vazão para a confluência do Rabagão com o Cávado para um caudal no rio Cávado de 0 m <sup>3</sup> /s (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2009d).....	31
Figura 16 – Condições de escoamento em bombagem de dois grupos em VN II e VN III (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2009d) .....	32
Figura 17 – Exemplo de curva granulométrica obtida para solos da albufeira de Salamonde (TEIXEIRA DUARTE Engenharia e Construções S.A., 1998) .....	33
Figura 18 – Descrição do espaço numa malha quadrática (ARCGIS 9.2 Desktop Help) .....	44
Figura 19 – Condições de escoamento para uma cheia de 660 m <sup>3</sup> /s no rio Rabagão para o Nmen nos ensaios em modelo reduzido (ARTELIA, 2013b) .....	45
Figura 20 – Interface do GUAD CREATOR após introdução da informação relativa ao terreno. ....	46
Figura 21 – Definição de uma condição fronteira de entrada no GUAD CREATOR: definição das células e da direção do escoamento .....	47
Figura 22 – Terreno triangulado na zona de restituição de Venda Nova III a partir de células de 0.25x0.25 m <sup>2</sup> com células de dimensão máxima de 1 metro e com diferença máxima de cota de 0.2 metros. ....	48
Figura 23 – Conjunto de superfícies da TIN criada pelo IBER.....	50
Figura 24 – Perfil (a vermelho) onde foram medidas as velocidades no modelo reduzido. ..	52

Figura 25 – Perfil transversal tipo com referencial local acoplado .....	52
Figura 26 – Linha de corte do modelo na restituição de Venda Nova III.....	53
Figura 27 – Problema na direção do escoamento na secção fronteira de jusante para a condição $h(t)$ no cenário R0_Nmen_BIII160_BII0. ....	54
Figura 28 – Modelo final após as 3 alterações ao modelo inicial.....	55
Figura 29 – Configuração dos sedimentos no fundo do canal junto à restituição de VN III (esq.) e VN II (dir.) (ARTELIA, 2013b) .....	56
Figura 30 – Configuração do canal no IBER após edição das cotas do fundo .....	56
Figura 31 – Diferentes condições para o Rock layer .....	57
Figura 32 – Mapa de velocidades para a malha de 0.50 m (esq.) e 0.25 m (dir.), para o IBER (cima) e GUAD 2D (baixo) .....	60
Figura 33 – Condições de escoamento na restituição de Venda Nova II para o cenário R0_Nmen_TIII200_TII50 (ARTELIA, 2013a).....	61
Figura 34 – Comparação das componentes transversal e longitudinal da velocidade na secção transversal de referência (ver Figura 23), obtidas pelos dois modelos utilizados .....	61
Figura 35 – Perfil de velocidades obtido no GUAD 2D para a malha de 0.5x0.5 m <sup>2</sup> .....	62
Figura 36 – Perfil de velocidades obtido no GUAD 2D para a malha de 0.25x0.25 m <sup>2</sup> .....	62
Figura 37 – Perfil de velocidades obtido no GUAD 2D e no IBER.....	64
Figura 38 – Valores de velocidades transversais obtidos em modelo reduzido na secção plana do canal .....	64
Figura 39 – Linhas de escoamento preferenciais em operações de turbinamento em Venda Nova III para o NmE. ....	65
Figura 40 – Má representação do espaço por parte de uma malha quadrada.....	65
Figura 41 – Localização dos perfis onde são analisadas as velocidades .....	68
Figura 42 – Divisão do escoamento para o NmE obtido em modelo reduzido .....	69
Figura 43 – Mapa de velocidades para simulação ao Nmen com sedimentos (esq., T=10h) e puramente hidrodinâmica (dir.) .....	70
Figura 44 – Reaproximação do escoamento à margem esquerda ao NmE a jusante da restituição de VN II .....	71
Figura 45 – Comparação do mapa de velocidades do IBER (esq.) e do GUAD 2D (dir.) .....	72
Figura 46 – Mapa de velocidades obtido no IBER, para o NmE+0.5m (esq. 3ª figura do apêndice A3) e para o Nmen (dir. 2ª figura do apêndice A3), na zona da restituição de VN II, com as escalas dos respectivos níveis. ....	73
Figura 47 – Alimentação assimétrica de VN II para o NmE verificada nos ensaios em modelo reduzido (ARTELIA, 2013a).....	73
Figura 48 – Separação do escoamento da margem esquerda para o NmE (Restituição de VN III em cima) .....	74

Figura 49 – Alteração do mapa de velocidades na margem esquerda com um $\Delta t=20s$ entre figuras para o GUAD 2D (Restituição de VN III em baixo). ....	75
Figura 50 – Comparação do mapa de velocidades obtido no GUAD 2D (esq.) e no IBER (dir.) .....	78
Figura 51 - Evolução do fundo do canal junto ao lábio da estrutura de restituição de VN III para o cenário R0_Nmen_BIII160_BII40.....	79
Figura 52 – Evolução do fundo do canal junto ao lábio da estrutura de restituição de VN III para o cenário R0_Nmen_BIII160_TII50.....	79
Figura 53 – Comparação da deposição de sedimentos no interior da estrutura de restituição de VN III.....	80
Figura 54 – Variação da configuração do escoamento com o tempo (GUAD 2D) .....	81
Figura 55 – Pormenor do campo de velocidades obtidos no GUAD 2D para o Nmen (esq.) e para o NPA (dir.), e para turbinamento em VN II de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ (em cima) e $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (em baixo), com escalas dos respetivos níveis. ....	83
Figura 56 – Mapa de Velocidades obtido no GUAD 2D (esq.) e no IBER (dir.) .....	85





## **ÍNDICE DE QUADROS**

Quadro 1 – Caudais instalados ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) nos aproveitamentos em estudo.....	37
Quadro 2 – Especificações das máquinas utilizadas para efetuar as simulações .....	39
Quadro 3 – Cenários de simulação de calibração/validação dos modelos .....	39
Quadro 4 – Número de grupos em funcionamento.....	40
Quadro 5 – Cenários de simulação de operações de turbinamento e bombagem .....	40
Quadro 6 – Número de células no GUAD 2D para o modelo inicial .....	58
Quadro 7 – Número de células .....	59





## SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A – Área [ $\text{m}^2$ ]

b – vetor unitário com a direção da linha de maior declive [m]

D – Diâmetro [m]

g – Aceleração da gravidade [ $\text{m/s}^2$ ]

h – Altura do escoamento [m]

I1 – Integral ao longo de uma fronteira líquida das áreas sobre as quais se calcula a pressão [ $\text{m}^2$ ]

I2 – Integral na fronteira sólida das áreas sobre as quais se calcula a pressão [ $\text{m}^2$ ]

Me – Massa que entra no sistema [kG]

Ms – Massa que sai do sistema [kG]

n – Coeficiente de rugosidade de Manning [ $\text{s}/(\text{m}^{1/3})$ ]

$n_s$  – Rugosidade devido às partículas do leito [ $\text{s}/(\text{m}^{1/3})$ ]

p – porosidade [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]

qs – Caudal sólido específico [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

Q – Caudal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

S – Inclinação do fundo do canal na formulação unidimensional [m/m]

Sf – Perda de carga devido à rugosidade das partículas [m/m]

S0 - Inclinação do fundo do canal [m/m]

u – velocidade média do escoamento na direção longitudinal ao mesmo [m/s]

U – Velocidade média do escoamento na formulação unidimensional (m/s)

v – velocidade média do escoamento na direção transversal ao mesmo [m/s]

V – Volume de controlo na formação unidimensional [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

x – Direção longitudinal ao escoamento [m]

$x_i$  – abcissa inicial de uma função [m]

$x_f$  – abcissa final de uma função [m]

y – Direção transversal ao escoamento [m]

Z – Cota do fundo do canal em relação à origem [m]

$\Delta t$  – Intervalo de cálculo no tempo (s)

$\Delta x$  – Intervalo de cálculo no espaço (m)

$\beta$  – Inclinação máxima em relação à horizontal [m/m]

Y – Peso Volúmico [ $\text{kN}/\text{m}^3$ ]

$\rho$  – Massa volúmica da água [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_s$  – Massa volúmica de um sólido [kg/m<sup>3</sup>]

$\tau$  – Tensão tangencial ao longo do fundo do canal [Pa]

AIA – Avaliação de Impacte Ambiental

ASCII - American Standard Code for Information Interchange

ARCGIS – Aeronautical Reconnaissance Coverage Geographic Information System

CEDEX – Centro de Estudios e Experimentación de Obras Públicas

EDP – Energias de Portugal

EDPSU – Energias de Portugal Serviço Universal

EESI – Environmental and Energy Study Institute

EIA – United States Energy Information Administration

ESA – Energy Storage Association

GEAMA – Grupo de Ingeniería del Aguace del Medio Ambiente

GIS – Geographical Information System

OCS – Office of Coastal Service

PIB - Produto Interno Bruto

REN – Redes Energéticas Nacionais

SNIRH – Serviço Nacional de Informação de Recursos Hídricos

SOGREAH – Société Grenobloise d'Études et d'Applications Hydrauliques

2D – Duas dimensões

ASCII - American Standard Code for Information Interchange

CFL – Courant-Friedrichs-Lewy

$h(t)$  – curva de alturas em função do tempo

min – minutos

MW – Megawatt

NMC – Nível Máximo de Cheia

NmE – Nível mínimo Extraordinário

Nmen – Nível mínimo de exploração normal

NPA – Nível de Pleno Armazenamento

$Q(h)$  – Curva de caudais em função da altura (curva de vazão)

$Q(t)$  – Curva de caudais em função do tempo

Sen – Seno

Tan – Tangente

TIN – Triangulated irregular network

VN II – Venda Nova II

VN III – Venda Nova III







# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

A eletricidade é um bem essencial em todos os países desenvolvidos ou em desenvolvimento não só por alimentar os consumos necessários ao bem-estar e conforto da população, mas também porque é o motor de contínuo desenvolvimento em todas as áreas de intervenção.

Num balanço atual (EIA, 2016) verifica-se que cerca de 70% da produção de eletricidade em muitos países tem origem em combustíveis fósseis, cuja utilização, como está cientificamente comprovado, é causadora de efeitos nocivos, quer para o ambiente do planeta, quer para a saúde das pessoas (EESI, 2015).

Como o país não possui reservas naturais de combustíveis fósseis, tendo por isso que importar energia, conclui-se que existe necessidade de substituir as fontes de energia não renováveis por fontes renováveis, com o objetivo melhorar o estado social e ambiental em simultâneo.

Portugal tem sido um bom exemplo do caminho nesse sentido, pois mais de metade da energia elétrica consumida em Portugal tem origem em tecnologias renováveis (EDPSU, 2016). Para este sucesso têm ajudado sobretudo a produção de energia hidroelétrica e eólica, nas quais a EDP tem contribuído significativamente.

A estratégia do grupo EDP passa pela promoção da exploração de centros eletroprodutores que utilizam fontes renováveis e aumento da capacidade de produção de eletricidade com base em recursos endógenos e renováveis (EDP, 2009). Também o Governo português tem vindo a rever os correspondentes objetivos, nomeadamente ao nível da produção hidroelétrica: a meta de obtenção de uma potência hidroelétrica instalada de 7000 MW estabelecida para o ano de 2020 (Ministério da Economia e Inovação, 2007), foi entretanto revista para um valor da potência instalada de 8540 MW para o mesmo ano (República Portuguesa, 2013).

No final de 2007, a potência total instalada em aproveitamentos hidroelétricos totalizava 5900 MW dos aproveitamentos construídos e contabilizando aqueles em fase de construção. Deste modo, seria necessário instalar 1100 MW para cumprir as metas governamentais estipuladas (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2008).

Foram desde então realizados novos aproveitamentos hidroelétricos, como é o caso do Baixo Sabor e de Foz Tua, ambos no vale do rio Douro, e reforços de potência em aproveitamentos hidráulicos existentes. São exemplos deste tipo os aproveitamentos de Salamonde II e Venda Nova III, esta última representada na Figura 1. Um reforço de potência consiste no aumento da potência instalada através da

instalação de maior capacidade de turbinamento ou de grupos reversíveis que permitem realizar operações de turbinamento ou operações de bombagem.

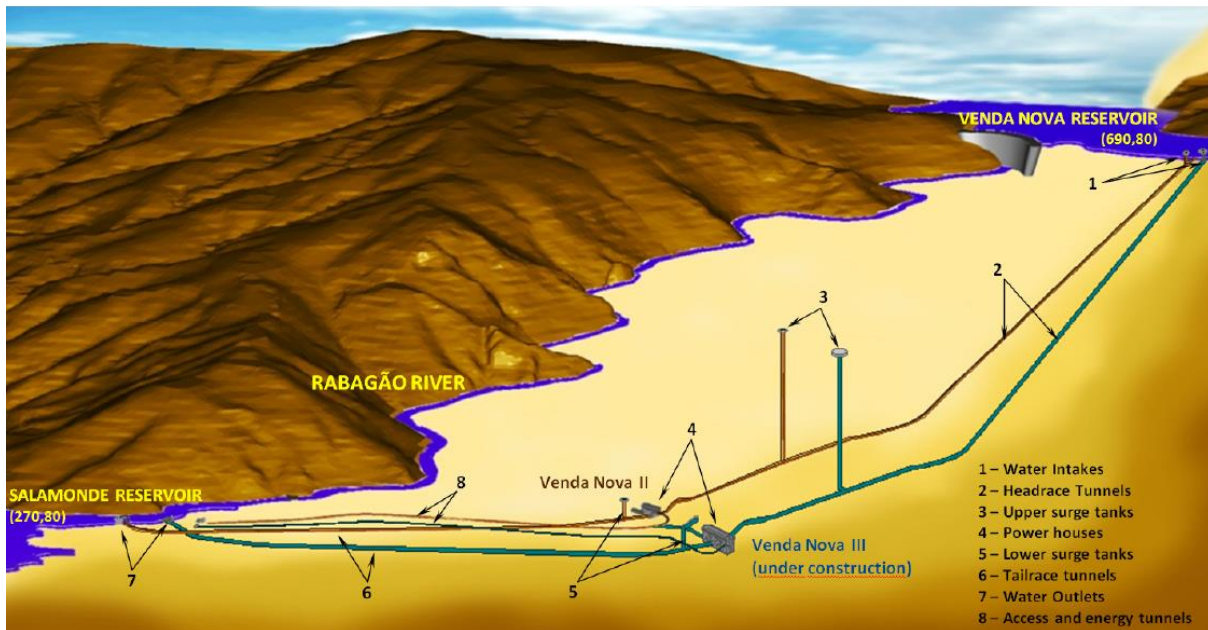


Figura 1 – Esquema dos aproveitamentos hidroelétricos de Venda Nova II e III (Ribeiro *et al.*, 2014)

A realização de reforços de potência foi também contextualizada e, de certo modo, promovida através de legislação (República Portuguesa, 2007), que permite a extensão dos períodos de concessão de aproveitamentos hidroelétricos se forem realizados reforços de potência (Ribeiro *et al.*, 2014). Tal também por forma a desenvolver o investimento em energias renováveis.

De facto, em conjunto com os aproveitamentos hidroelétricos, houve nos últimos anos um forte investimento em parques eólicos, que aproveitam a energia do vento mas que funcionam com intermitência, pois a velocidade do vento é variável no tempo. Constata-se que, frequentemente, os períodos em que é possível a maior produção de energia, aproveitando o vento como fonte de energia, correspondem aos períodos noturnos, ou seja, em que o consumo energético é inferior (REN, 2016).

Não havendo consumidores finais e não sendo ainda possível o armazenamento em grande escala de energia elétrica (Stone, 2016), a melhor solução para armazenar o excesso de energia disponível corresponde à bombagem de água desde um reservatório situado num ponto mais baixo para um reservatório num ponto alto (ESA, 2013), acumulando-se energia sob a forma de energia potencial gravítica. Esta será novamente transformada em energia elétrica quando necessário através de operações de turbinamento.

Soluções desse tipo correspondem a aproveitamentos hidroelétricos equipados com grupos reversíveis, ou seja, com capacidade de bombagem. Esta solução pode ser explorada de modo a aproveitar o excesso de produção de energia em períodos de menor consumo do seguinte modo: nos períodos de baixo consumo o preço da energia é menor e então a solução passa pela bombagem de água da albufeira de jusante para a albufeira de montante e assim armazenar a água. Nas horas de maior consumo, em que é expectável que o preço da energia seja superior, água será turbinada para produzir energia. Assim evita-se um possível défice de fornecimento de energia à rede em períodos de pico de consumo e obtém-se rendimento com o diferencial do preço de energia existente entre os períodos de maior e menor consumo.

Com o intuito de maximizar a eficiência de produção de energia elétrica, nos reforços de potência de Venda Nova II e Venda Nova III foram instalados grupos reversíveis, também designados grupos



turbina-bomba. Com estas máquinas pode-se turbinar e produzir energia que é enviada para a rede elétrica, ou bombear para montante, consumindo energia. Possuem um tempo de resposta rápido às flutuações de consumo, atingindo num curto espaço de tempo a potência máxima a partir de uma situação de paragem. Esta é uma solução excelente para a estabilidade da rede (ESA, 2013).

Foi nesse enquadramento que foi lançado o projeto do aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova III, atualmente em fase final de construção. Equipado com máquinas reversíveis turbina-bomba, este aproveitamento tem uma potência instalada de 781MW em turbinamento (EDP, 2016), contribuindo para o objetivo definido pelo governo para 2020, antes referido.

Para a alimentação na bombagem das turbinas-bombas é necessário garantir a devida submersão, ou seja, existência de uma altura mínima de água nas estruturas de tomada de água e da restituição que, durante as operações de bombagem funciona como tomada de água. Essas estruturas devem ser dimensionadas de modo a permitir a entrada e saída do caudal máximo, quer para o funcionamento em turbinamento quer em bombagem, pois têm a dupla função de entrada e de saída de água do circuito hidráulico.

Em muitos casos, as estruturas de tomada/restituição de água encontram-se em secções de albufeiras propícias e, por este facto, não é necessário desenvolver estudos muito pormenorizados da zona envolvente à estrutura de entrada ou saída de água. No entanto, ocorrem situações em que estas estruturas se encontram em secções contraídas da albufeira e onde poderá ser necessária uma intervenção física.

No caso de Venda Nova III foi necessário escavar o leito do rio Rabagão desde a zona da restituição até à confluência com o rio Cávado. Esse canal artificializado tem dimensões suficientes grandes e com uma configuração tal que a alimentação do caudal máximo a partir da albufeira de Salomonde, considerando os modos de funcionamento e operação do aproveitamento, não sejam limitados pelo canal.

Casos como este devem ser cuidadosamente estudados devido à ocorrência de fenómenos complexos através do uso de modelos numéricos e físicos.

Os modelos correspondem a uma simplificação da realidade que têm como objetivo a obtenção de resultados aproximados dos processos físicos que ocorrem numa área de estudo. Os modelos físicos são construídos em laboratório, enquanto os modelos numéricos regem-se segundo equações definidoras dos processos a analisar e são resolvidas com o auxílio de computadores.

Os modelos numéricos hidrodinâmicos são ferramentas poderosas que permitem a simulação de escoamentos e a obtenção de valores de variáveis definidoras de um escoamento como a altura do escoamento, o caudal e a velocidade, num certo local de uma zona de estudo para um determinado instante de tempo e as suas variações com o tempo.

Estas ferramentas são, normalmente, soluções menos onerosas e mais rápidas que a modelação física, pois não necessitam de investimento na construção de um modelo reduzido de uma estrutura ou canal para várias simulações. No entanto, tratando-se de aproximações à realidade, os resultados obtidos por modelos numéricos devem ser sujeitos a uma cuidadosa análise das condições introduzidas e de uma validação dos resultados obtidos. Esta validação poderá ser obtida através da comparação com os resultados de modelos físicos quando estes estão disponíveis.

O presente trabalho visa a simulação hidrodinâmica de um caso prático através do uso de modelos numéricos disponíveis em *software* profissional e foi realizado em ambiente empresarial, no âmbito de um estágio curricular na secção de Hidráulica da Direção de Engenharia de Barragens da EDP Produção S.A, empresa do grupo EDP, Energias de Portugal.

O trabalho a realizar enquadra-se no âmbito dos reforços de potência do aproveitamento de Venda Nova: Venda Nova II e Venda Nova III, este último numa fase final de construção durante a elaboração deste trabalho.

Ambos os aproveitamentos hidroelétricos possuem máquinas reversíveis, que podem funcionar em turbinamento ou bombagem e, durante a execução do projeto de Venda Nova III, foi ponderado o funcionamento deste novo aproveitamento em funcionamento isolado e em simultâneo com Venda Nova II. As hipóteses de funcionamento previstas em projeto consistiam em operações de turbinamento nas duas centrais em simultâneo bem como operações de bombagem em condições semelhantes.

O canal onde estão localizadas as obras de restituição (assim genericamente designadas, daqui em diante, por simplicidade de linguagem) é constituído por um braço fluvial da margem esquerda da albufeira de Salamonde, que corresponde à foz do rio Rabagão. Esta secção possuía uma largura e profundidades que limitavam o funcionamento das duas centrais referidas nas condições indicadas acima.

Estes empreendimentos possuem as respetivas obras de restituição em turbinamento (tomada de água em bombagem) muito próximas entre si, o que implica a ocorrência de escoamentos complexos que têm de ser alvos de estudos minuciosos de modo a que seja possível detetar pormenores que possam limitar a exploração dos aproveitamentos hidroelétricos.

Durante a fase de projeto do reforço de potência de Venda Nova III foram realizados estudos hidráulicos com recurso a modelos numéricos, a uma e duas dimensões, e a modelos reduzidos nos laboratórios da Sogreah, em Grenoble, que simularam o escoamento no canal resultante das condições de funcionamento estipuladas em projeto e do nível de água e caudal escoado na albufeira de Salamonde.

Após a realização destes estudos, e com o objetivo de maximizar a flexibilidade de exploração destes aproveitamentos foi ponderada a possibilidade de funcionamento em simultâneo dos dois aproveitamentos com um deles a funcionar em modo de turbinamento enquanto o outro se encontra a bombear. Durante estes processos, a estrutura de restituição da central que opera em turbinamento estará a restituir água para o rio Rabagão, enquanto que a estrutura de restituição da central que opera em bombagem estará a absorver água, funcionando como tomada de água. As condições de escoamento resultantes no canal são complexas e não estavam previstas em fase de projeto, devendo a sua viabilidade ser estudada.

Este trabalho debruça-se sobre o estudo destas condições de funcionamento recorrendo a modelos hidrodinâmicos bidimensionais.

## 1.2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são os seguintes:

- Utilização de modelos numéricos de simulação hidrodinâmica bidimensionais para representar escoamentos com superfície livre e com um grau de confiança elevado, numa zona que englobe as duas estruturas de restituição (tomada de água em bombagem) do circuito hidráulico dos aproveitamentos de Venda Nova II e de Venda Nova III e uma dada extensão fluvial para montante e para jusante dessas obras, de modo a incluir efeitos que possam ocorrer fora da zona situada entre as duas restituições e que possam influenciar os resultados;
- Calibração dos modelos através da simulação de condições de funcionamento em turbinamento e em bombagem de um ou dos dois aproveitamentos e comparação dos resultados obtidos com os análogos em modelos numéricos e nos ensaios em modelo reduzido (realizados no âmbito do projeto de Venda Nova III);
- Utilização dos modelos preparados para simulação de condições de funcionamento dos grupos que não foram analisadas no projeto de Venda Nova III: turbinamento numa central e bombagem na outra, em simultâneo;
- Análise dos resultados e retirada de conclusões relativas à viabilidade das operações de turbinamento e bombagem em simultâneo dos dois aproveitamentos, no que diz respeito ao escoamento no canal de restituição;
- Definição de passos futuros no âmbito deste estudo que resultem das conclusões retiradas do presente estudo;
- Como objetivo complementar ao trabalho, foi aproveitada a potencialidade de um dos modelos em simular transporte de sedimentos e o facto de existirem resultados dos ensaios em modelo reduzido com sedimentos, para verificar a viabilidade das tais operações de turbinamento e bombagem em simultâneo na presença de sedimentos.

Estas tarefas serão executadas em diferentes programas computacionais que utilizam como base dos modelos numéricos utilizadas equações diferenciais hiperbólicas de escoamentos em duas dimensões. Esses programas são o GUAD 2D e o IBER. O GUAD 2D é um *software* comercial que já foi utilizado em vários estudos realizados pela EDP Produção e do qual, portanto, já existe experiência e registo de bom comportamento do mesmo para variados cenários. Apesar de ainda não ter sido utilizado em estudos desenvolvidos pela EDP Produção, o IBER, possui um módulo de avaliação de transporte de sedimentos, algo que o GUAD 2D não apresenta.

Na realidade, a opção pela utilização de dois programas computacionais consiste no facto de que o IBER ser um *freeware* e poderá ser alternativa ao GUAD 2D ou servir para estudos simples sem necessidade de utilizar uma máquina com a licença comercial do GUAD 2D.

O objetivo do uso do IBER será, desde logo, a partir da construção de um modelo em tudo semelhante ao GUAD 2D, efetuar uma comparação entre os resultados obtidos nos dois modelos numéricos e no modelo reduzido de modo a avaliar o bom comportamento do IBER para simulações hidrodinâmicas.

Em fase seguinte será testado o módulo de transporte de sedimentos incluído no IBER com os resultados obtidos em modelo reduzido de modo a concluir sobre o bom ou mau funcionamento deste módulo e sobre a possibilidade do uso desta ferramenta em trabalhos futuros, com esse fim.

### **1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Este documento encontra-se dividido em 7 capítulos:

O presente **capítulo 1** contém um breve enquadramento do problema a ser analisado e os objetivos a que o autor se propõe para elaboração do trabalho. É ainda apresentada uma síntese introdutória de cada capítulo, de modo a explicar sucintamente o seu conteúdo.

O **capítulo 2** sintetiza as bases físicas e matemáticas dos modelos numéricos utilizados no trabalho. Tendo em conta que os programas de simulação utilizam equações de escoamento a duas dimensões, torna-se necessário introduzir uma sequência de conceitos e definições dos escoamentos com superfície livre. Deste modo, são apresentados os diferentes tipos de escoamentos com superfície livre possíveis e as equações que representam os escoamentos, com uma apresentação das equações que definem o escoamento em duas dimensões, pois estas são a base dos programas a utilizar no presente trabalho.

Assim, serão expostos os métodos de resolução das equações e as formulações matemáticas que incluem o transporte de sedimentos, com o objetivo de se fazer uma simulação de escoamento com fundos móveis.

O **capítulo 3** corresponde à introdução ao caso de estudo deste trabalho: o canal em que é feita a restituição em turbinamento (e a captação em bombagem) das centrais hidroelétricas de Venda Nova II e Venda Nova III. Neste capítulo pode-se encontrar um enquadramento histórico e geográfico da zona de estudo, assim como uma descrição sucinta da obra de reforço de potência de Venda Nova III. Por fim, é apresentada com pormenor a zona que deverá ser estudada no modelo a ser criado, elaborando a caracterização física e hidráulica da zona de estudo.

O **capítulo 4** descreve os critérios e cenários de simulação. O capítulo está dividido em 3 partes: primeiro são referidos os estudos efetuados pela EDP Produção na fase de projeto do aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova III, em segundo lugar são definidos os cenários a simular, tendo em conta os resultados do primeiro ponto e os objetivos definidos para este trabalho e por último são expostas e justificadas as condições fronteira a utilizar nos modelos.

O **capítulo 5** descreve a criação dos dois modelos de simulação, percorrendo os passos de criação do modelo físico e dos testes de calibração dos modelos criados, que serão validados ou não, tendo em conta os resultados disponíveis, aos quais o autor deste trabalho teve acesso. Por fim, é apresentada uma análise de sensibilidade para definir a precisão da malha de cálculo.

O **capítulo 6** é dedicado à análise dos resultados das simulações efetuadas para os cenários propostos. As condições de turbinamento e bombagem serão as condições de funcionamento mais simples do sistema a analisar, pelo que são as primeiras apresentadas. De seguida são analisados os resultados de cenários de funcionamento simultâneo em turbinamento e bombagem, situação que não havia sido prevista no projeto da restituição de Venda Nova II. Neste subcapítulo serão analisados cenários com transporte de sedimentos, de modo a avaliar se das operações simultâneas de turbinamento e bombagem pode resultar a entrada de sedimentos nas tomadas de água em bombagem.

O **capítulo 7** inclui as conclusões finais a retirar das análises efetuadas, ou seja, a viabilidade de exploração para condições de exploração imprevistas em projeto, uma análise do trabalho efetuado e das restrições e limitações existentes ou adversidades encontradas, de modo a que seja possível fazer eventuais críticas aos programas de simulação de escoamentos utilizados.

## 2

## ESCOAMENTOS COM SUPERFÍCIE LIVRE

De modo a avaliar e compreender certos fenómenos é necessário ter bases científicas sobre aquilo que se quer analisar. Por isso, este capítulo contém uma breve descrição dos tipos de escoamento que podem ser encontrados em superfície livre e quais as equações que os representam nas formulações unidimensional e bidimensional. O capítulo debruça-se também sobre os métodos de resolução das equações, com uma abordagem básica sobre o funcionamento dos métodos e do tipo de malhas utilizadas por estes métodos. São apresentadas ainda as equações utilizadas pelo programa computacional IBER para simular o transporte de sedimentos por arrastamento. No final do capítulo é possível compreender o modo de obtenção dos valores das variáveis definidoras de um escoamento sem entrar em pormenores de programação dos modelos numéricos.

## 2.1. TIPOS DE ESCOAMENTO

Os escoamentos com superfície livre são caracterizados por uma corrente líquida parcialmente confinada por paredes sólidas e que contacta com uma superfície gasosa- normalmente a atmosfera. As paredes que limitam o escoamento corporizam um canal e a zona de contacto entre os dois meios líquido e gasoso designa-se superfície livre.

Os escoamentos dividem-se em escoamentos permanentes e variáveis. A diferença entre os vários escoamentos encontra-se na sua variabilidade no tempo e no espaço.

## 2.1.1. ESCOAMENTOS PERMANENTES

Dentro dos escoamentos permanentes pode existir o regime uniforme, em que não há variação do caudal com o tempo nem da secção de escoamento com o espaço, ou seja, a superfície livre é paralela ao talvegue do canal, que corresponde ao eixo longitudinal  $x$ .

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial A}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

O regime permanente uniforme só pode ocorrer em canais prismáticos, pois na natureza não se verifica um canal com secção constante ao longo de uma determinada extensão.

Segundo Almeida (2003), o regime permanente variado existe quando, para uma secção variável, o caudal é constante:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \text{ e } \frac{\partial A}{\partial x} \neq 0 \quad (2)$$

Para este regime, os escoamentos podem ser gradualmente variados ou rapidamente variados. Nos escoamentos gradualmente variados as velocidades são aproximadamente normais às secções retas dos escoamentos, as distribuições das pressões numa secção transversal são do tipo hidrostático, verifica-se em grandes extensões do canal e pode designar-se por regolho (Taveira Pinto, 2013). Nos escoamentos rapidamente variados existe uma variação brusca das condições do escoamento e não há distribuição de pressões numa secção transversal do tipo hidrostático. Normalmente associa-se a um regime gradualmente variado a montante ou a jusante para o caso de um ressalto hidráulico e possui uma curta extensão.

Rapidamente se percebe que este tipo de escoamentos apenas ocorre em canais artificiais, pois na natureza é quase impossível encontrar canais com secções constantes e com caudais afluentes constantes. Deste modo, os escoamentos variáveis possuem uma importância superior nos estudos de hidráulica fluvial.

### 2.1.2. ESCOAMENTOS VARIÁVEIS

Os escoamentos variáveis (ou não permanentes) ocorrem quando existe uma variação das grandezas principais do escoamento (caudal, velocidade e altura) no tempo e no espaço. A partir deste ponto, definem-se estas como as três principais grandezas que definem um escoamento variável, sendo a área do escoamento definida pela topografia do canal e dependente da altura do escoamento.

Os escoamentos variáveis podem ser uniformes, apenas em teoria, em que as três grandezas variam apenas com o tempo (Almeida, 2003), ou não uniformes.

Os escoamentos não uniformes podem ser graduais ou rápidos. Nos graduais, tal como para os escoamentos permanentes gradualmente variados, a alteração das grandezas é suficientemente lenta para as derivadas das grandezas serem válidas:

$$\frac{\partial Q}{\partial t}, \frac{\partial V}{\partial t}, \frac{\partial h}{\partial t}, \frac{\partial Q}{\partial x}, \frac{\partial V}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3)$$

Nos regimes rápidos existe uma variação veloz no tempo e no espaço das grandezas, as derivadas escritas em (3) são de difícil definição e não há distribuição hidrostática das pressões. Nestes regimes podem-se incluir fenómenos como o ressalto hidráulico e vórtices, associados a descarregadores de cheia e a meandros, por exemplo.

A maioria das simulações que utilizam modelos numéricos utilizam duas secções, uma inicial e outra final, como fronteiras do modelo, para entrada e saída do escoamento. Se as condições de entrada e saída corresponderem a dois regimes permanentes, o escoamento variável entre essas duas secções designa-se por transitório (Almeida, 2003).

Os escoamentos variáveis são de perceção mais difícil e a resolução analítica das equações matemáticas que os representam é difícil. A comunidade científica foi então criando e aperfeiçoando modelos numéricos de resolução das equações de águas pouco profundas com base em leis científicas, hipóteses de base e simplificações. Com a constante evolução do poder de processamento, a resolução destas equações nos vários modelos tem vindo a tornar-se menos morosa e permitindo assim o uso de modelos cada vez mais precisos.

Os modelos numéricos utilizados classificam-se de hidrodinâmicos quando contém apenas equações de conservação da massa líquida e quantidade de movimento (OCS, 2016) (Antunes do Carmo, 2004). Estes modelos podem ser complementados com informação de transporte sólido.

O estudo dos escoamentos transitórios tem em conta uma formulação unidimensional ou bidimensional quando se considera apenas a direção principal, longitudinal do escoamento,  $x$ , ou duas,  $x$  e  $y$ , longitudinal e transversal ao escoamento, respetivamente. As características deste tipo de escoamentos são descritas pelas equações de Saint-Venant, derivadas das equações de Navier-Stokes, que supõem que o movimento do fluido segue os princípios da conservação da massa e da quantidade de movimento e que permitem a obtenção dos valores da velocidade e altura em cada instante, num determinado ponto do espaço.

## 2.2. FORMULAÇÃO UNIDIMENSIONAL

Os modelos unidimensionais são considerados em casos em que a velocidade é dominante numa certa direção, pelo que a inclusão de outra dimensão na análise não iria, em primeira análise, aumentar significativamente a fiabilidade dos resultados das simulações. O objetivo é o de simplificar os modelos gradualmente variáveis. Colocam-se, então, as seguintes hipóteses base, descritas em García-Navarro, Alcrudo (1995):

- Declividade média do leito do canal é pequena ( $\sin \theta \approx \tan \theta \approx S$ );
- Leito do canal é considerado fixo;
- Canal prismático com escoamento unidimensional de velocidade uniformemente distribuída;
- Distribuição de pressões hidrostática (escoamento variável gradual), com curvatura das linhas de corrente pequena;
- Fluido incompressível e homogéneo.

Um modo de se deduzir as equações de Saint-Venant corresponde à técnica do volume de controlo. Esta técnica supõe a existência de um volume intermédio, simplificado na Figura 2, onde está a entrar uma quantidade de água igual à que sai num mesmo intervalo de tempo,  $\Delta t$ . A equação que suporta esta condição é a condição da continuidade ou de conservação da massa líquida.

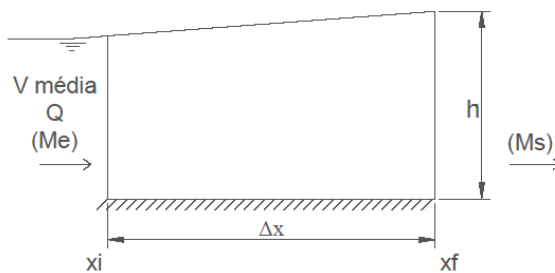


Figura 2 – Volume de controlo e variáveis intervenientes

Atendendo que a massa que entra, por unidade de tempo, na secção de montante do volume de controlo é de:

$$M_e = \rho A_i V / \Delta t = \rho Q \quad (4)$$

Sendo  $\rho$  a massa volúmica,  $A_i$  a área da fronteira de montante  $i$ , e  $Q$  o caudal de escoamento. A massa de água que sai pela secção de jusante do volume de controlo, por unidade de tempo corresponde a:

$$M_s = \rho \left( A + \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x \right) \left( V + \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x \right) \quad (5)$$

Considerando que a massa de líquido no volume de controlo se mantém constante no tempo tem-se:

$$\frac{d}{dt} \int_{x_i}^{x_f} \rho A dx + [\rho A(\Delta V)]_f - [\rho A(\Delta V)]_i = 0 \quad (6)$$

Utilizando o teorema do valor médio:

$$\Delta x = x_2 - x_1 ; \int_{x_i}^{x_f} F(x) dx = F(c) \Delta x \quad c \in [x_i, x_f] \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho A \Delta x + [\rho A(\Delta V)]_f - [\rho A(\Delta V)]_i = 0 \quad (8)$$

Dividindo a equação por  $\Delta x$ , considerando  $\Delta x \rightarrow 0$ , um fluido incompressível e o caudal como sendo o produto da área de uma dada secção pela velocidade média, reescreve-se a equação (8) ((Cunge *et al*, 1980):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

A conservação da quantidade de movimento pode ser descrita na forma diferencial do seguinte modo:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} + g I_1 \right) = g I_2 + g A (S_0 - S_f) \quad (10)$$

Em que  $g$  corresponde á aceleração da gravidade,  $S_0$  é o declive do canal,  $S_f$  é a perda de energia do escoamento devido à rugosidade das partículas do leito e as componentes  $I_1$  e  $I_2$  correspondem à componente devido à pressão hidrostática e às forças de pressão nas fronteira do volume de controlo, devido às variações longitudinais da largura do canal. A equação apresentada considera as forças de pressão, gravíticas e de resistência que ocorrem num determinado volume de controlo para um intervalo  $\Delta x \rightarrow 0$ . Estas definições estão integralmente justificadas e demonstradas em Cunge *et al* (1980), García-Navarro, Alcrudo (1995) e Antunes do Carmo (2004).



O conjunto das duas equações de conservação de Saint-Venant (9) e (10) forma um sistema que é resolvido para as variáveis dependentes  $Q$  e  $A$ .

### 2.3. FORMULAÇÃO BIDIMENSIONAL

Os modelos bidimensionais são considerados nos casos em que não se verifica a existência de uma direção de escoamento dominante. Estes modelos permitem a obtenção de resultados para fenómenos localizados que os modelos unidimensionais não permitem obter, como vórtices e interação de escoamentos com direções diferentes. Estes modelos são, então, mais completos que os modelos unidimensionais, mas necessitam de maior capacidade de processamento que os últimos, para um mesmo cenário.

As equações que governam os escoamentos variáveis bidimensionais, agora em duas dimensões espaciais, representam as leis da conservação da massa líquida e da quantidade de movimento. Designam-se equações de águas pouco profundas (*shallow-water equations*) pois aplicam-se a escoamentos em que a dimensão vertical é negligenciável face à escala horizontal. Na derivação das equações considera-se a distribuição da pressão como sendo hidrostática, negligenciando a aceleração vertical das partículas de água (Yu, 2013).

Escoamentos que podem ser representados por estas equações são escoamentos resultantes de uma rotura de uma barragem e escoamentos de superfície livre em rios ou canais artificiais (Zhou *et al*, 2001).

Estas equações são de demonstração matemática mais complicada, pois formam um sistema hiperbólico de leis de conservação não linear. Estas equações podem ser encontradas em Abbot (1979) e Zhao *et al* (1994) e as suas deduções podem ser encontradas em Dawson e Mirabito (2008). As equações diferenciais são apresentadas na sua forma conservativa de seguida:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = S(U) \quad (11)$$

Em que  $U$  representa um vetor físico das variáveis dependentes,  $F$  e  $G$  correspondem ao vetor fluxo na direção  $x$  e  $y$ , respetivamente, dos limites de um volume de controlo e  $S$  representa os termos relativos à inclinação dos fundos e ao atrito devido às partículas do leito. Estas componentes são definidas do seguinte modo (Toro, 2001):

$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}; F(U) = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + g \frac{h^2}{2} \\ huv \end{bmatrix}; G(U) = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + g \frac{h^2}{2} \end{bmatrix}; S(U) = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Sendo  $h$ , a altura do escoamento,  $u$  e  $v$ , as velocidades médias na direção longitudinal,  $x$ , e transversal,  $y$ , ao escoamento, respetivamente, e  $g$ , a aceleração da gravidade. As componentes  $S_{0x}$  e  $S_{0y}$  correspondem ao declive do fundo do canal e as componentes  $S_{fx}$  e  $S_{fy}$  são as componentes devido ao atrito da água com as partículas do fundo do canal (rugosidade) correspondentes a:

$$S_{0x} = -\frac{\partial z}{\partial x} \quad e \quad S_{0y} = -\frac{\partial z}{\partial y} \quad (13)$$

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad e \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (14)$$

## 2.4. MÉTODOS DE RESOLUÇÃO

Existem vários métodos numéricos para resolver as equações de águas pouco profundas, que não possuem soluções analíticas. Exemplos desses são os métodos de diferenças finitas, de elementos finitos e de volumes finitos. Estes métodos têm todos como base a divisão do espaço num número finito de células.

A resolução das equações passa por discretizar o espaço por onde o escoamento se processa em polígonos, que correspondem a células que fazem parte de uma malha estruturada ou não.

Discretização “é o processo de expressar leis gerais do escoamento, escritas para um meio contínuo, em termos de valores discretos num número finito de pontos no domínio espaço-tempo, de modo a satisfazer as leis básicas o melhor possível” (Cunge *et al*, 1980: 53).

A escolha da malha é um fator importante na elaboração de um bom modelo numérico.

Esta divisão do espaço pode ser efetuada de modo a obter dois tipos de malha: ortogonais ou não ortogonais. As malhas ortogonais possuem com células quadrangulares a possuírem o mesmo tamanho (caso das divisões no método das diferenças finitas).

As malhas não ortogonais podem ser constituídas por figuras geométricas diferentes de quadrados, sendo utilizados triângulos em muitos casos (Anderson, 1994). As malhas não ortogonais designam-se estruturadas quando há divisão das células por grupos, não havendo uma aleatoriedade de tamanhos na disposição das células, como é o caso da figura seguinte, onde são visíveis duas “famílias de células à esquerda e à direita:

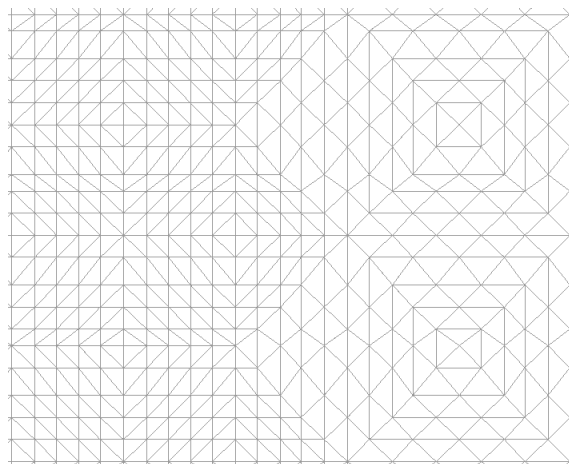


Figura 3 – Exemplo de uma malha triangular estruturada (obtida no programa IBER)

Nas malhas não estruturadas, a disposição das células é mais complexa, com o objetivo de haver uma melhor adaptação à geometria, como se verifica na figura seguinte:

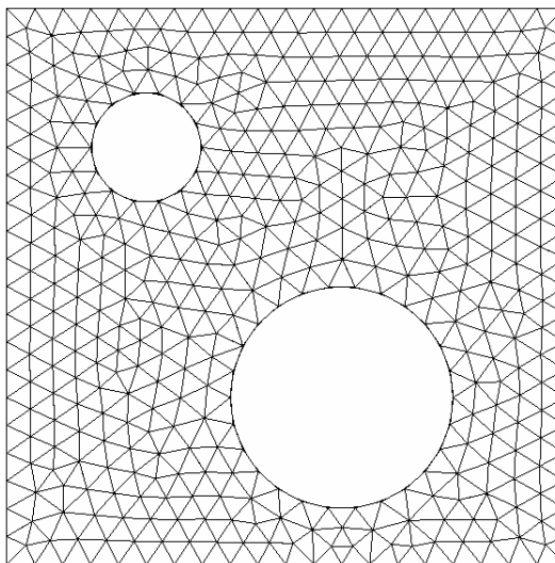


Figura 4 – Exemplo de uma malha não estruturada (Gonçalves, 2007)

O método das diferenças finitas é baseado na discretização direta das equações diferenciais, que são convertidas em equações algébricas através da utilização de séries de Taylor (Zhao *et al.*, 1994). As derivadas são substituídas por aproximações baseadas em diferenças finitas entre dois pontos seguidos de uma malha quadrática uniforme (ortogonal) previamente estabelecida. As equações diferenciais são explicitadas para cada ponto, depois são subtraídas e explicitadas entre pontos sucessivos.

O método dos elementos finitos consiste na divisão do espaço em elementos (Chung, 1978). Os elementos possuem pontos ou nós que são unidos por linhas de contorno que limitam os mesmos. Não se resolvem as equações diferenciais originais, mas sim uma aproximação às mesmas, com o objetivo de obter os valores das variáveis do escoamento nos nós, que são as incógnitas do problema (Cook *et al.*, 1989). As equações diferenciais são multiplicadas por uma função de ponderação e integradas sobre todo o domínio. Por fim uma solução aproximada é construída usando funções de forma (Wu, 2008: 117).

Este método permite a obtenção do valor das variáveis no centro de cada elemento através da resolução das equações aproximadas por métodos diretos ou iterativos. Uma vantagem em relação ao método das diferenças finitas é a possibilidade de utilização de malhas não ortogonais.

O método dos volumes finitos tem como ponto de partida a forma de integral das equações e consiste na divisão do domínio de estudo em volumes de controlo contíguos aos quais são aplicadas as equações de conservação.

Este método combina as vantagens dos métodos de diferenças finitas e elementos finitos: a simplicidade na existência de valores discretos para os valores das variáveis e flexibilidade geométrica (a malha não necessita de ser quadrangular e os elementos podem ser diferentes entre si), respetivamente (Murillo *et al.*, 2006), (Zhao *et al.*, 1994). Outra vantagem prende-se no facto de que os métodos de volumes finitos não requerem um esforço computacional tão elevado como o necessário para o método dos elementos finitos.

Os métodos de volumes finitos são usados para discretizar as equações de águas pouco profundas, (11) e (12), na forma de integral: para cada célula de uma malha integram-se as equações no intuito de obter os valores das variáveis descritas para o centro geométrico (nó) da mesma. Para este método a divisão

do espaço pode ser feita de modo irregular, ou seja, é possível obter células quadrangulares ou triangulares no plano horizontal.

As superfícies dos volumes de controlo (células) correspondem às linhas da grelha e os valores dos fluxos são calculados por métodos numéricos em função dos valores dos nós.

Na resolução das equações de águas pouco profundas, um fator importante na qualidade dos resultados é o passo de tempo, ou seja, qual intervalo de tempo entre dois instantes consecutivos para os quais são resolvidas as equações. A condição Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) limita o passo de tempo na resolução de equações diferenciais a um valor máximo e que normalmente é menor que 1 (Murillo *et al*, 2006), mas segundo o mesmo poderá ser superior a 1 para certas condições.

A condição CFL é uma relação entre o incremento espacial e temporal, pelo que é necessário, mas não suficiente, ter uma relação entre o tamanho das células e o intervalo de tempo entre os instantes em que são obtidos os resultados para obter precisão e convergência porque, por experiência própria:

- A definição de um passo de tempo muito grande (significa utilizar um valor elevado da condição CFL) em relação à dimensão das células pode significar que haverá perda de informação que leva a resultados erróneos.
- A utilização um passo de tempo diminuto significa melhor qualidade dos resultados mas implica um maior dispêndio de poder computacional e de tempo de cálculo.

Para um estudo aprofundado do método dos volumes finitos, a abordagem a grelhas com células triangulares, os processos de discretização e a definição dos passos de tempo são bem descritos por Berzins, Ware (1995). Murillo, Brufau e Garcia-Navarro (2007) e Murillo *et al* (2006), abordam os problemas encontrados na criação do software GUAD 2D, que será utilizado no âmbito deste trabalho.

## 2.5. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

A modelação do transporte sólido é um campo de investigação recente ainda não explorado por muitos investigadores, mas que tem vindo a evoluir gradualmente. Olsen (1999) utilizou um modelo numérico com uma grelha em duas dimensões que envolvia fundos móveis e se baseava nas equações de Navier-Stokes e Wu *et al* (2005) usaram um modelo numérico 2D para simular o escoamento, o transporte de sedimentos e a evolução dos fundos através de um método de elementos finitos.

Uma equipe de investigadores liderada por (Murillo *et al*, 2008) tem desenvolvido modelos em duas dimensões baseados em métodos de volumes finitos que procuram incluir os parâmetros de mobilidade sedimentar.

Os modelos numéricos que incluem dinâmica sedimentar denominam-se modelos morfodinâmicos e admitem equações de dinâmica sedimentar e conservação dos sedimentos (Antunes do Carmo, 2004). Estas equações podem ser adicionadas às equações de conservação da massa líquida e da quantidade de movimento (GEAMA, 2014).

O transporte de sedimentos pode ser em suspensão, quando as velocidades do escoamento são elevadas e/ou o peso das partículas é baixo, ou por arrastamento ou saltação, quando o peso das partículas é mais elevado e o transporte é feito junto ao fundo do canal.

As equações que “governam” o escoamento em duas dimensões com transporte de sedimentos por arrastamento são semelhantes às apresentadas em 2.3. correspondentes à formulação bidimensional.

Uma possível equação a empregar para transporte sólido é a equação de conservação de Exner (Paolo, 2012), que é utilizada pelo programa IBER na definição da seguinte equação de conservação:

$$(1-p)\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{q_{s,x}}{\partial x} + \frac{q_{s,y}}{\partial y} = D - E \quad (15)$$

Em que  $p$  é a porosidade do material,  $Z$  é a cota do fundo do canal em relação à origem,  $q_{s,x}$  e  $q_{s,y}$  são as componentes do caudal sólido nas direções  $x$  e  $y$ , respetivamente, e  $D-E$  corresponde ao balanço volumico entre transporte por arrastamento e em suspensão.

A equação é resolvida pelo método dos volumes finitos através da integração das derivadas parciais em cada célula de uma malha. O método de resolução empregue no IBER (software a utilizar para modelos morfodinâmicos) é apresentado no manual de referência hidráulica daquele modelo computacional (GEAMA, 2014).

O modelo morfodinâmico elaborado e usado para simulação no programa de cálculo IBER, possui particularidades no que diz respeito às fórmulas de cálculo de tensões de fundo, da inclinação do canal e da gravidade no transporte sólido.

O programa dispõe da opção de escolha de cálculo do caudal sólido através de várias equações; Para o transporte por arrastamento é possível usar a fórmula de *Meyer-Peter&Müller* ou de *Van Rijn*.

É necessário calcular a tensão de arrastamento no fundo do canal devido à rugosidade das partículas. O programa computacional que se utilizou neste trabalho obtém esse valor utilizando a fórmula de Einstein (1941) empregue por Meyer-Peter, Müller (1948) na sua formulação:

$$\tau_s^* = \tau_t^* \left( \frac{n_s}{n} \right)^{3/2} \quad (16)$$

Em que  $\tau_s^*$  é a tensão de corte adimensional devido à forma das partículas,  $\tau_t^*$  é a tensão de corte total adimensional,  $n_s$  é a rugosidade devido às partículas e  $n$  é a rugosidade total, com:

$$n_s = \frac{(2.5D_{50})^{1/6}}{25} \quad (17)$$

Em que  $D$  é a dimensão (diâmetro) da partícula. O programa utiliza apenas o  $D_{50}$  que é a dimensão obtida numa amostra em que 50% do material possui dimensão menor que essa. A tensão de corte adimensional calcula-se do seguinte modo:

$$\tau^* = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)D} \quad (18)$$

Com  $\gamma_s$  a corresponder ao peso volúmico das partículas e  $\gamma$  a corresponder ao peso volúmico da água.

Segundo Meyer-Peter, Müller (1948) e atendendo a novas revisões por Wong, Parker (2006), o caudal sólido por unidade de largura das células é calculado pela seguinte fórmula empírica:

$$\frac{q_{b*}}{\gamma_s \sqrt{(\gamma_s / \gamma - 1)g(D_{50})^3}} = 3.97 \left[ \frac{(n_s / n)^{3/2} \gamma R S_f}{-0.0495} \right]^{3/2} \quad (19)$$

Sendo  $q_{b*}$  o caudal sólido específico por unidade de tempo e largura,  $g$  a aceleração da gravidade,  $R$  o raio hidráulico do canal e as restantes variáveis a terem o mesmo significado já apresentado nesta secção. Multiplicando pela largura da célula obtém-se o caudal sólido.

Quando o fundo não é plano é necessário fazer um ajuste à tensão de corte:

$$\tau_{s,ef}^* = \tau_s^* + \frac{\tau_{c,0}^*}{\tan(\phi)} * \sin(\beta) * b \quad (20)$$

Esta equação é resolvida na forma vetorial, com  $\tau_{s,ef}^*$  a tensão de corte adimensional total tendo em conta a inclinação do fundo,  $\tau_{c,0}^*$  é a tensão de corte adimensional crítica para um fundo horizontal,  $\phi$  é o ângulo de atrito do material,  $\beta$  a inclinação máxima das células em relação à horizontal e  $b$  um vetor unitário com a direção da linha de maior declive da célula.

A tensão crítica adimensional é reduzida proporcionalmente à componente da gravidade normal à inclinação do fundo:

$$\tau_{ef,c}^* = \tau_{c,0}^* * \cos(\beta) \quad (21)$$

Todas estas definições e suposições encontram-se definidas e justificadas no manual de referência hidráulica do IBER, (GEAMA, 2014). Para mais informação ver Wu (2008), Moges (2010) ou Barry, Goodwin (2007).

## 3

## CASO DE ESTUDO

O bom conhecimento da zona de estudo e do enquadramento físico e histórico é fundamental para a compreensão do problema a ser trabalhado. Por esse motivo este capítulo descreve os trabalhos efetuados e a descrição do aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova III. São apresentadas em pormenor as obras na zona de estudo, a sua configuração e os dados para efetuar a caracterização física e hidráulica. A informação apresentada neste capítulo é essencial para a definição dos cenários de simulação e dos modelos de simulação, apresentados nos capítulos seguintes.

### 3.1. LOCALIZAÇÃO E BREVE DESCRIÇÃO DA OBRA

O aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova III, o segundo reforço de potência do aproveitamento de Venda Nova, situa-se no sistema hidroelétrico da bacia Cávado-Rabagão-Homem (conjunto de 6 aproveitamentos de grande dimensão integrados nos rios indicados na Figura 5), a cerca de 37 quilómetros a Nordeste da cidade de Braga e é acessível a partir da estrada nacional 103. O aproveitamento situa-se entre as albufeiras da barragem de Venda Nova, a montante, e da barragem de Salamonde, a jusante, tirando partido do diferencial altimétrico entre as duas referidas barragens e da sua capacidade de armazenamento.

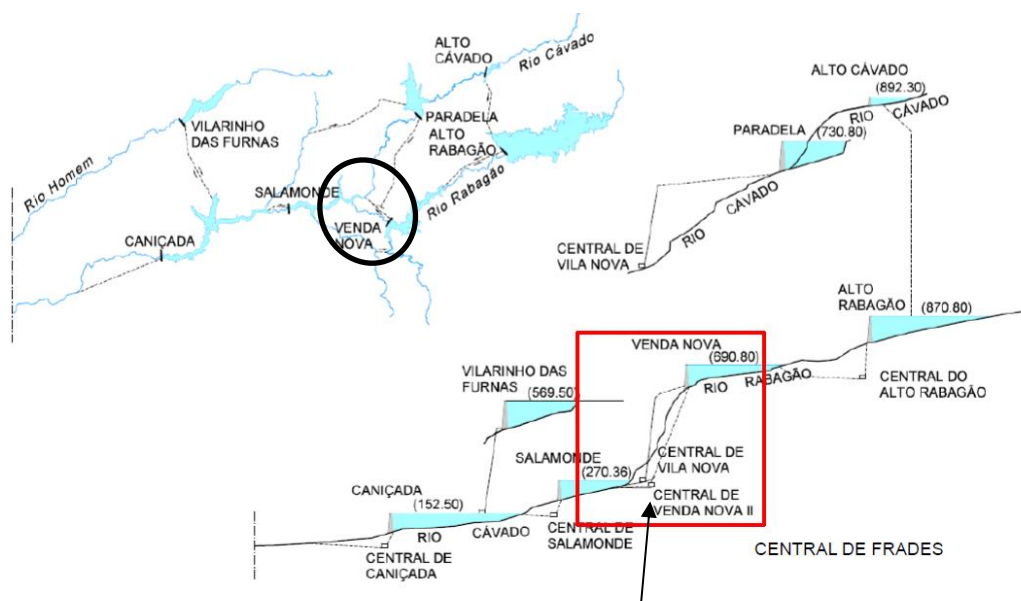


Figura 5 – Localização do novo reforço de potência de Venda Nova III (Maia, 2015)

Os reforços de potência de Venda Nova aproveitam uma cascata que recebe água de uma bacia hidrográfica de 239.35 km<sup>2</sup> que aflui ao rio Rabagão (SNIRH, 2016) e um volume de armazenamento útil de 92 hectómetros cúbicos na albufeira de Venda Nova. A albufeira de Salomonde possui 65 hectómetros cúbicos numa área de 242 hectares (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2009a).

O desnível entre as duas albufeiras é de cerca de 420 metros e as mesmas albufeiras encontram-se numa zona de elevada pluviosidade, o que significa que existe um grande potencial de produção de energia. Na realidade, até à construção do aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova II, não havia mesmo a capacidade de turbinar uma parte significativa da água que afluía à albufeira de Venda Nova.

A construção da barragem de Venda Nova finalizou-se em 1951, entrando a central de Vila Nova em funcionamento no mesmo ano. Esta central situa-se a montante da foz do rio Rabagão, na margem esquerda do rio Cávado, e permitia o fornecimento de energia elétrica por turbinamento numa altura em que as centrais dos grandes aproveitamentos hidroelétricos ainda eram em número reduzido.

Em 2005 foi concluído o reforço de potência de Venda Nova II, que possuía 2 grupos turbina-bomba reversíveis com capacidade para turbinar 2x25m<sup>3</sup>/s, com potência instalada de 97.1 MW (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2009a), cujo objetivo era o de expandir o sistema eletroprodutor nacional, aproveitando os caudais que eram descarregados em situações de cheia. Este aproveitamento proporcionou um maior controlo do armazenamento de água para suprimir os problemas de falta de energia devido à funcionalidade intermitente das fontes renováveis existentes.

Ainda antes da conclusão do segundo reforço de potência de Venda Nova, que previa já um segundo reforço de potência para o futuro, pôde concluir-se que o caudal instalado nas duas referidas centrais poderia ser aumentado pois as duas centrais existentes (Vila Nova e Venda Nova II) possuíam já um caudal instalado que absorve os caudais afluentes à albufeira de Venda Nova. Deste modo, a construção de um novo empreendimento visa maioritariamente a bombagem e reserva para períodos de pico.

Um estudo técnico-económico realizado em 2007 pela EDP (Ribeiro *et al*, 2014) comparou a realização de 29 potenciais novos reforços de potência e concluiu que o de Venda Nova III seria o mais rentável, muito devido à sua capacidade de bombagem.

Após um estudo preliminar que visava a instalação de um caudal de 60, 80 ou 120 m<sup>3</sup>/s, em 2008 foi decidido que o projeto seria realizado para 200 m<sup>3</sup>/s distribuídos por 2 grupos, após estudos técnico-económicos não justificarem uma flexibilidade de exploração com 4 grupos. A potência instalada fixou-se nos 781MW que, até à data, é a maior potência instalada no país (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2008).

A construção começou em 2010 e as obras encontram-se em fase de conclusão, tendo um custo aproximado de 320 milhões de euros (EDP, 2010a). O empreendimento irá ser um dos ativos mais importantes da EDP, pois é o primeiro empreendimento equipado com grupos reversíveis de velocidade variável (EDP, 2010b), podendo fornecer uma resposta rápida às flutuações de consumo: picos de consumo e diminuição brusca do vento.

### 3.2. BREVE DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO

Apresentado na Figura 1, o reforço de potência de Venda Nova III possui um circuito hidráulico extenso constituído por uma conduta que se reparte por 2 grupos. A central, subterrânea, encontra-se a uma cota superior à cota da albufeira de Salomonde, e por isso o túnel de restituição possui um trecho final ascendente com uma seção igual à do túnel em carga. Nos pontos seguintes são apresentados os pormenores da obra em detalhe, representados em corte na Figura 6.



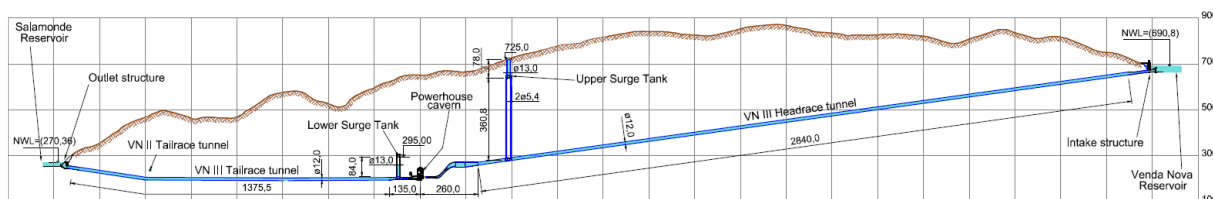


Figura 6 – Esquema do reforço de potência de Venda Nova III

### 3.2.1. TOMADA DE ÁGUA

A tomada de água situa-se perto da tomada de água existente da central de Venda Nova II, podendo aproveitar parte do túnel de ataque existente, realizado para a execução daquele aproveitamento, e tirar partido das características geológicas e geotécnicas do maciço rochoso que asseguram condições de emboquilhamento (entrada do túnel). Foi considerada, genericamente, a “*mesma concepção de Venda Nova II*” na definição para solução do projeto (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2008: 32) por forma a minimizar os custos e garantir adequadas condições de turbinamento/bombagem.

O bocal é retangular, com 13.20 m de altura por 18.00 m de largura na zona de entrada de água, equipado com grade fixa. Possui uma torre de manobra onde estão instaladas as comportas de segurança tipo vagão e as comportas de ensecadeira tipo corrediça. Há depois uma transição retangular-circular para o túnel em carga.

### 3.2.2. TÚNEL DE ALIMENTAÇÃO EM CARGA

No estudo preliminar de VN III, realizado em 2003 concluiu-se que a solução na margem esquerda “*permite a implantação de soluções técnicas menos onerosas e é a que apresenta menores riscos geológicos e ambientais, e consequentemente económicos*” (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2008: 22).

O túnel possui um perfil longitudinal de 2840 metros de extensão com inclinação de 13.81% até à entrada do desarenador, imediatamente antes da central, com uma secção de 12.00 metros de diâmetro ao longo do túnel em carga, que em quase toda a sua extensão é revestido apenas com betão projetado, sendo alargada para 20.00 metros no desarenador (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2009a).



Figura 7 – Vista de montante para o desarenador

A chaminé de equilíbrio superior (ver Figura 6) encontra-se imediatamente a montante do desarenador (Figura 7), tendo 13 metros de diâmetro ao longo dos 78 metros superiores e possuindo 2 poços de ligação de 5.40 metros de diâmetro e de cerca de 360 metros de altura, de modo a garantir estabilidade e o amortecimento das oscilações do nível e a evitar a propagação dos efeitos do choque hidráulico para o túnel de carga a montante da chaminé.

A jusante do desarenador é provocado um aumento de velocidade do escoamento através da diminuição da secção na parte blindada do circuito, imediatamente a montante da central. A parte blindada contém um convergente de tronco cónico em que o diâmetro diminui para 5.90 m. Este trecho subdivide-se em 2 ramais de diâmetro interior de 4.30 m que alimentam os respetivos grupos (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2009a).

### 3.2.3. CENTRAL

A central é constituída por duas câmaras adjacentes, sendo a maior a câmara dos grupos, com dimensões de 22.00 m x 101.50 m e altura de 55 m, e a de menores dimensões a câmara dos transformadores, que possui dimensões de 19.60 m x 50.00 m, tendo 20.00 m de altura (EDP, 2016). Ambas as câmaras são abobadadas.

Na câmara dos grupos existem dois Grupos Francis reversíveis de eixo vertical com cada grupo constituído por uma turbina-bomba de velocidade variável e por um alternador-motor síncrono diretamente acoplado. Na câmara dos transformadores existem dois transformadores trifásicos com potência nominal de 420 MVA.

Existem válvulas esféricas a montante dos grupos de 3.20 metros de diâmetro e comportas ensecadeiras a jusante de dimensões 3.70 m x 5.60 m em ambas as condutas, de modo a permitir o acesso para manutenção dos grupos (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2009a).

Após a junção das condutas de restituição encontra-se a chaminé de equilíbrio inferior, com cerca de 94.6 m de altura. O túnel de acesso à parte superior da chaminé possui um muro que não permite a passagem de água pelo coroamento aquando dos níveis máximos extraordinários das oscilações da chaminé para o túnel, mas permite que a secção livre funcione como arejamento da chaminé.

#### 3.2.4. TÚNEL DE RESTITUIÇÃO

As condicionantes geológicas propícias encontram-se significativamente a jusante da restituição de VN II, o que aumentava o comprimento do túnel de restituição pelo que se decidiu construir a restituição de VN III a montante da restituição de Venda Nova II (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2008).

De modo a implementar a solução adotada, foi necessário fazer um cruzamento em planta (ver Figura 1) dos túneis de restituição de VN II e VN III. Este fator obrigou que o túnel de restituição Venda Nova III possuísse um trecho ascendente, com a cota do plano médio da roda das turbinas a situar-se à cota (207.00), ou seja, cerca de 60 metros abaixo do nível mínimo de exploração normal na Albufeira de Salamonde (260.56) (EDP, 2016).

O túnel de restituição possui cerca de 1030 metros de comprimento e 12.00 metros de diâmetro, também essencialmente revestido com betão projetado, com inclinação de 0.5% e o trecho final de cerca de 307 metros com inclinação de 15% ascendente para jusante (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2009a).

#### 3.2.5. RESTITUIÇÃO

Foi criada uma rampa de ataque para a construção do túnel de restituição pela zona da estrutura de restituição, protegido por uma ensecadeira. Com uma cota de coroamento da ensecadeira de (272.00) a ensecadeira assegurou que não haveria restrições à exploração normal da albufeira de Salamonde, garantindo praticamente sem folgas o escoamento do caudal de dimensionamento do descarregador de Venda Nova juntamente com um caudal de 600 m<sup>3</sup>/s no rio Cávado. Esta solução evitou custos adicionais necessários para túneis de acesso específicos.

Condicionantes topográficas, geológicas e relativas ao adequado funcionamento hidráulico da estrutura de restituição, para a localização planimétrica e altimétrica da estrutura, levaram a uma solução de restituição com conceção semelhante à de Venda Nova II.

O bocal possui 11.00 m de altura por 21.20 m de largura, com ranhuras para colocação de grades do tipo corredeira amovíveis e comportas de ensecadeiras, divididas por 2 septos, e com soleira circular para controlo de escoamento, com crista à cota (257.00). Está implantado a cerca de 120 metros da restituição de Venda Nova II (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2009a).

Existe uma plataforma superior à cota (274.00) com cerca de 15 metros de largura por 30 de comprimento (visível na Figura 8) que permite a colocação das grades e a sua substituição, em alturas de manutenção, pelas comportas ensecadeira, com via de acesso proveniente da restituição de Venda Nova II.



Figura 8 – Restituição em turbinamento de Venda Nova III

#### 3.2.6. TÚNEIS DE ACESSO E ATAQUE

O acesso à central é realizado pelo túnel de acesso à central de Venda Nova II, tendo sido construído um novo túnel para realizar as obras subterrâneas, para ventilação e para encaminhar os cabos de energia de 400 kV entre a central e o Posto de Corte e o Edifício de Apoio, situado no exterior (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2009c). Estes foram construídos ao lado dos edifícios existentes para o mesmo efeito no empreendimento de Venda Nova II. Foram construídos novos túneis para acesso às várias frentes de trabalho de obras.

#### 3.2.7. ESTUDOS AMBIENTAIS

Dada a natureza das intervenções (maioritariamente subterrâneas), não foi, à data do projeto previsível a ocorrência de qualquer impacto negativo por parte da EDP Produção que pudesse condicionar a realização do projeto devido a um parecer desfavorável na AIA: os impactos identificados foram relativos a volumes de escombros (paisagem) e a possíveis problemas na qualidade de águas subterrâneas, pelo que o projeto foi considerado viável do ponto de vista ambiental, visto corresponder a uma utilização de um elevado potencial de energia pela via renovável, sem a presença de efeitos negativos significativos do ponto de vista ambiental (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2009a).

### 3.3. ENQUADRAMENTO DO ESTUDO A REALIZAR

A zona de estudo a modelar corresponde a um troço do braço da albufeira de Salamonde na zona da foz do rio Rabagão, num vale apertado que limita a largura do rio e tem a particularidade de possuir duas obras de restituição implantadas em períodos distintos. O canal, apresentado na figura seguinte, encontra-se artificializado por razões a indicar de seguida.





Figura 9 – Vista de satélite da zona de estudo antes da demolição da ensecadeira 28-8-2013 (Google Earth Pro)

A obra de restituição de Venda Nova II não foi projetada prevendo a restituição de Venda Nova III a montante desta. As duas obras possuem a mesma configuração e orientação, encontrando-se espaçadas de cerca de 110 metros e possuindo dimensões bastante distintas, pois a restituição em turbinamento de Venda Nova III foi dimensionada para um caudal 4 vezes superior ao caudal de dimensionamento de Venda Nova II. Atendendo que a largura do canal é reduzida e que se situa imediatamente a jusante de uma curva, tornou-se necessário estudar cuidadosamente a zona.

O objetivo de artificializar um trecho natural do rio Rabagão foi o de conseguir que a exploração da central hidroelétrica não fosse condicionada pela morfologia no canal, ou seja, obter um escoamento que permitisse o escoamento do caudal em bombagem de Venda Nova III o mais uniforme possível e que não provocasse transporte de sedimentos, para situações consideradas as mais gravosas.

Quando estudos aprofundados confirmaram que as dimensões do canal não permitiam o escoamento do caudal em bombagem, tornou-se necessário definir a morfologia do canal ao longo do comprimento do rio que limitava o abastecimento do caudal máximo de bombagem em Venda Nova III.

Para estes casos é necessário um projeto de escavação e remoção do material necessário até que se consiga efetuar o escoamento do caudal de adução, com características consideradas adequadas. A forma final do canal convém ser o mais uniforme possível, quer para facilidade de execução dos trabalhos quer para se obter um escoamento também ele o mais uniforme possível. A solução mais frequente é a de um

canal trapezoidal. Esta forma é não só uma solução hidraulicamente funcional mas que segundo Swamee, Chahar (2015) tem em conta a estabilidade das margens.

O aumento da secção do canal permite o escoamento dos caudais turbinados e bombados com uma velocidade menor que aquela que se verificaria no canal natural, diminuindo as perdas de carga e também a erosão do fundo e das margens.

A Direção de Engenharia de Barragens da EDP Produção efetuou estudos hidrodinâmicos recorrendo a modelos numéricos unidimensionais e a ensaios em modelo reduzido no Laboratório de estudos da SOGREAH (agora pertencente ao grupo ARTELIA) em Grenoble.

O estudo hidrodinâmico unidimensional simulou o funcionamento dos dois reforços de potência e abrangeu numa zona de estudo que vai desde a restituição de Venda Nova III até à barragem de Salomonde, com uma extensão de cerca de 8 km. Foi utilizado um modelo unidimensional com o intuito de verificar se o canal natural permitia o funcionamento das centrais para as situações de exploração normal de Salomonde, ou seja, verificar se poderia haver bombagem dos caudais preconizados em projeto desde o nível de pleno armazenamento até ao nível mínimo extraordinário (259.00).

Nesse estudo considerou-se a manobra de funcionamento em bombagem aquela em que há arranque em sequência e alternando sucessivamente os grupos de cada central, iniciando a manobra pelas máquinas de Venda Nova III e com variação do caudal desde zero até ao máximo em 30 segundos. Para turbinamento considerou-se o arranque em simultâneo dos quatro grupos dos dois aproveitamento durante os mesmos 30 segundos.

As secções de retirada de resultados correspondem às zonas das restituições em turbinamento, à confluência do rio Cávado com o rio Rabagão e à secção imediatamente a montante da barragem de Salomonde.

Os estudos hidrodinâmicos efetuados permitiram concluir que, sem alterar as dimensões do canal existente não havia condições de funcionamento do sistema em bombagem, pois não havia entrada de água na tomada de água em bombagem de Venda Nova III para um conjunto de níveis da albufeira de Salomonde superior ao nível mínimo extraordinário (259.00).

O gráfico da perda de energia em função da altura da albufeira (Figura 10) compara as opções estudadas pela EDP Produção para a definição da largura do canal. Do código 32+35, o primeiro número corresponde à largura do canal entre as duas restituições e o segundo número corresponde à largura do canal numa extensão de cerca de 100 metros a jusante da restituição de Venda Nova II.

Pela análise do gráfico, conclui-se que a perda de energia entre a barragem de Salomonde e a restituição aumenta com a diminuição do nível da albufeira e esse aumento é menor para a solução de 32+35. Isto permite que o funcionamento em bombagem das centrais ocorra por um período mais longo. Por este motivo, a solução definida para o canal pela EDP Produção foi a de 32 metros de largura entre as restituições e de 35 metros entre a restituição de Venda Nova II e uma secção a cerca de 100 metros a jusante da referida restituição.

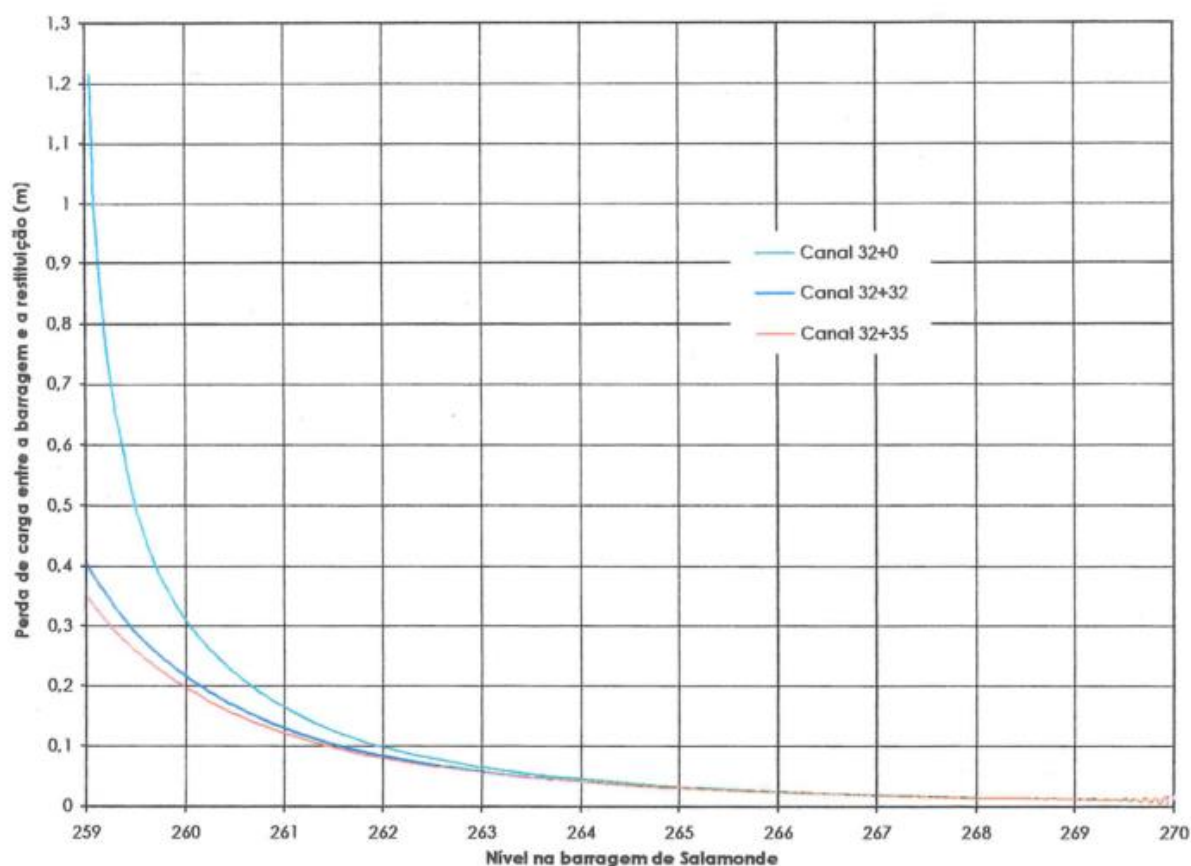


Figura 10 – Perda de energia na albufeira de Salomonde para as diferentes opções estudadas (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2009d)

Após a definição da geometria final do canal, a EDP Produção efetuou estudos de operações de bombagem e turbinamento envolvendo os dois aproveitamentos, simulando o esvaziamento e o enchimento da albufeira, respetivamente. Os estudos foram realizados para diferentes níveis iniciais e para hipóteses de caudais nulos, de 600 e 1200 m<sup>3</sup>/s nos rios Rabagão e Cávado. Os resultados visavam obter os tempos de enchimento e esvaziamento da albufeira, ou seja, os tempos de funcionamento máximo de uma operação, se se confirmava ser garantido o abastecimento às restituições para níveis abaixo, ou pelo menos igual ao nível mínimo extraordinário e as velocidades médias para as secções das restituições e da confluência dos rios.

As obras de alteração do canal foram efetuadas no período de abaixamento da albufeira de Salomonde para a construção e posterior demolição da ensecadeira de proteção das obras no túnel e do bocal de restituição em 2011 (Figura 11) e 2014, respetivamente. Esta operação ocorreu com o objetivo de minimizar o período de indisponibilidade de funcionamento do aproveitamento de Salomonde e também do aproveitamento de Venda Nova II. Deste modo, apenas foi necessário proceder a dois rebaixamentos da albufeira de Salomonde, primeiro em e depois para realizar todas as operações. O volume de escavação totaliza 25000 m<sup>3</sup> (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2009a).



Figura 11 – Obras no leito do canal a 09-05-2011 (Ribeiro *et al*, 2014)

A zona intervencionada durante as obras referidas ficou com as seguintes características (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2009d):

- Declive de 10% em cerca de 30m para passar do canal natural para o artificial a montante da restituição de Venda Nova III;
- Canal com 32 metros de largura à cota (255.00) e margens de inclinação 3:2 (V:H) entre as duas restituições;
- Parte da ensecadeira provisória não foi demolida numa extensão de alguns metros desde a margem (a montante da restituição) de modo a funcionar como barreira (ao transporte) e reencaminhamento de sedimentos para longe da obra de restituição de Venda Nova III;
- Canal com 35 metros de largura à cota (255.00) e margens de inclinação 1:1 (V:H) a jusante da restituição de Venda Nova II numa extensão de 250 metros;
- A intervenção nas margens ocorreu desde a cota do talvegue até ao NPA de Salamonde;
- A extensão do canal intervencionada ficou com declive horizontal nulo;
- Ensecadeira parcialmente demolida, mantendo-se dois níveis submersos adjacentes ao encontro de montante e os dois encontros com o objetivo de evitar o transporte de sedimentos para dentro da restituição de Venda Nova III.





Figura 12 – Zona de estudo com ensecadeira provisória de jusante (EDP, 2014)

### 3.4. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E HIDRÁULICA DA ZONA DE ESTUDO MODELAR

#### 3.4.1. TOPOGRAFIA

De modo a caracterizar o terreno recorreu-se a topografias existentes de períodos que vão desde o período de execução do projeto de Venda Nova II até a estudos posteriores ao projeto de Venda Nova III. A zona ficou caracterizada com recurso a três fontes:

- A planta final do canal de restituição do ano de 2009 (PRT200900132- Obras no Leito do Rio Rabagão. Definição) à escala 1:500 (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2009e); foi utilizada desde a secção o fim da curva acentuada à direita (ver as duas figuras seguintes) até à confluência do rio Rabagão com o rio Cávado;
- A secção das duas curvas é caracterizada por uma topografia de pormenor com origem no mesmo levantamento utilizado para o projeto das obras no canal de restituição, pelo que as curvas de nível de ambos os ficheiros não necessitaram de ajustes;
- A zona a montante das curvas, correspondente a um vale mais confinado, e que corresponde a uma boa zona de controlo foi caracterizada por um levantamento efetuado pela ARTESCAN-3D Scanning, LDA após a construção da ensecadeira provisória na restituição de Venda Nova III, que consiste numa nuvem de pontos georreferenciados aos quais são adicionadas cotas. O processo utilizado não permite a obtenção de pontos situados abaixo do nível da água.



Figura 13 – Nuvem de pontos em formato 3D obtido pela ARTESCAN

Como a zona abrangida por este último levantamento corresponde à cauda da albufeira, a zona central que se encontrava abaixo do nível de água durante o período da obtenção da nuvem de pontos (Figura 13 a preto) não se encontra caracterizada por dados contínuos no espaço. Para esse local recorreu-se a perfis do terreno utilizados no projeto de Venda Nova II à escala 1:250.

A zona a montante e correspondente às curvas, adjacentes, foi caracterizada por métodos diferentes e em instantes de tempo distintos, e por essa razão verificou-se um pequeno desfasamento na zona de intersecção das curvas de nível. A solução passou por efetuar um corte nas curvas de nível ao longo de uma faixa de cerca de 1 metro e depois unir as referidas curvas de ambos os estudos. Dada a existência de imprecisões nas operações de levantamento topográfico este ajuste não é significativo na introdução de erro no modelo.

Quanto às estruturas de restituição, recorreu-se a desenhos do projeto das duas obras de restituição para representar da melhor forma as duas estruturas complexas. Por fim, a ensecadeira foi representada com base nos desenhos do projeto de demolição da mesma do ano de 2009 à escala 1:200. Com base em visitas feitas à obra, verificou-se a existência de alterações na solução final em relação ao projeto, nomeadamente, a simplificação dos cortes efetuados na estrutura de montante da ensecadeira.

O processo de modelação da topografia foi realizado no *software* de desenho computadorizado AUTOCAD 2014. Como os ficheiros a utilizar estavam georreferenciados, no tratamento da geografia apenas foi necessário efetuar cópias dos diferentes ficheiros para um único. No entanto, as estruturas não estavam referenciadas, nem no plano horizontal nem no vertical. Através da análise de desenhos de projeto em 2D modelou-se as estruturas em 3D.

Após a modelação das estruturas de restituição e da ensecadeira, a topografia da zona de estudo ficou completamente caracterizada. O modelo a utilizar nas simulações tem como base a figura apresentada de seguida:

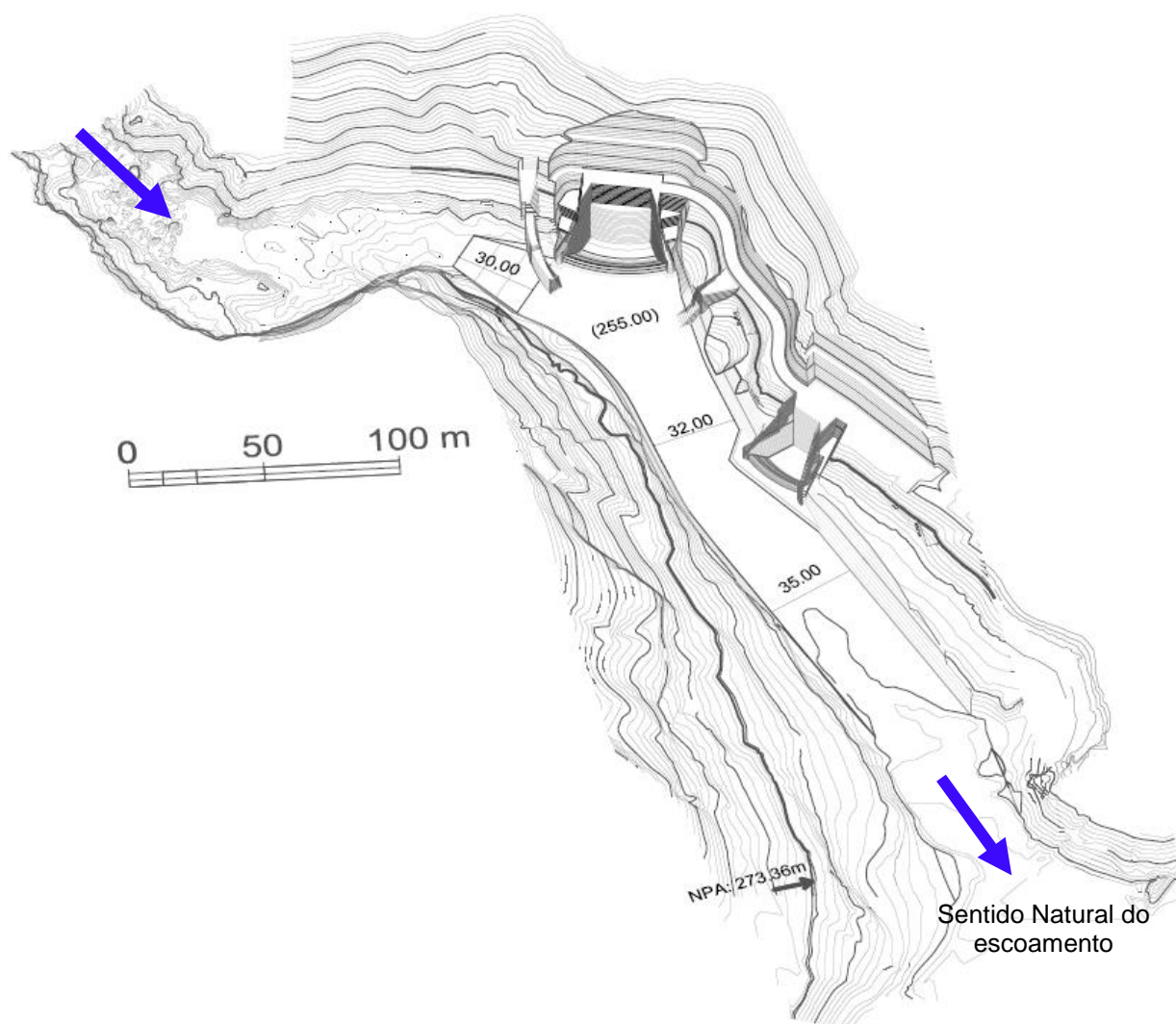


Figura 14 – Topografia da zona de estudo: Zona de montante na parte superior e zona de jusante na parte inferior

### 3.4.2. RUGOSIDADE DO LEITO

A rugosidade das margens é um fator importante na caracterização de um escoamento. O atrito entre a água e as margens e o fundo do canal determina uma variação da velocidade de um escoamento no espaço. Na equação de Manning, este fator é representado por uma constante  $n$ . A presença de vegetação nas margens, a dimensão e a forma das partículas no fundo do canal, as irregularidades do canal em perímetro molhado, perfil transversal e formas de fundo, o alinhamento do canal (Chow, 1959), entre outros, são fatores que influenciam o valor da rugosidade de um canal natural (Aldridge, Garrett, 1973).

Verifica-se que a escolha de um valor único para uma longa extensão de um canal natural é uma simplificação que poderá incluir um erro significativo de cálculo num modelo hidrodinâmico, se esse valor for mal escolhido. Por esta razão as ferramentas de cálculo a utilizar neste estudo já incluem opções

de introdução de ficheiros de dados com valores de rugosidade, definindo assim um valor de rugosidade para cada célula.

No entanto, a quantificação de um valor de rugosidade é uma tarefa complicada, que requer dados de boa qualidade e recentes e também muitos anos de experiência para tomar uma opção correta.

Chow (1959) apresenta uma tabela completa de valores do coeficiente de rugosidade para diferentes tipos de canais em casos distintos. Esta tabela, elaborada por Horton em 1919, ainda que antiga, é utilizada atualmente como base inicial para definição de coeficientes de rugosidade.

Sabendo as informações relativas ao material existente no fundo e nas margens e que o tipo de material é semelhante em toda a extensão da zona de estudo, a introdução de valores de rugosidade diferentes para zonas distintas não será o fator que trará mais fiabilidade ao trabalho.

Salienta-se que a diferenciação dos valores  $n$  da rugosidade das estruturas de restituição, lisas, (teoricamente inferiores às que se encontram no canal natural), em relação à rugosidade das margens e do leito, seria uma mais-valia para a obtenção de resultados mais próximos dos reais. Mas como o processamento computacional é um fator a ter em conta, optou-se pela utilização de um valor único para o fator de rugosidade,  $n$ .

Feita uma consulta bibliográfica, e, para o caso de um canal natural meandrizado, com margens inclinadas e pouca vegetação a obstruir o escoamento, o valor considerado para a constante  $n$  é 0.05 (Aldridge, Garrett, 1973; Chow, 1959).

#### 3.4.3. NÍVEIS DE FUNCIONAMENTO

Os níveis da albufeira para os quais serão efetuadas as simulações correspondem ao Nível Máximo de Cheia (NMC), ao Nível de Pleno Armazenamento (NPA), ao Nível mínimo de exploração Normal (Nmen) e ao Nível Mínimo Extraordinário (NmE). As respetivas cotas estão apresentadas abaixo, com destaque para as cotas na albufeira de Salamonde, que são as necessárias para o trabalho.

##### 3.4.3.1. Albufeira de Venda Nova

- NMC=691.30m;
- NPA=690.80m;
- Nmen=685.80m;
- NmE=684.00m;

##### 3.4.3.2. Albufeira de Salamonde

- NMC=270.86m;
- NPA=270.36m;
- Nmen=260.56m;
- NmE=259.00m=NmE (VN II);

#### 3.4.4. CURVAS DE VAZÃO

As curvas de vazão a empregar na condição de fronteira de jusante correspondem às curvas apresentadas EDP -Gestão da Produção de Energia S.A. (2009). Estas curvas foram obtidas através de estudos de regolfo envolvendo a albufeira de Salamonde, desde essa barragem até ao local da restituição de Venda

Nova III, no intuito de comparar a vazão no canal natural com o canal escavado. Foram obtidas curvas de vazão para as secções das duas restituições e para a confluência do Rabagão com o Cávado.

Para o estudo a realizar, estas curvas de vazão correspondem a condições fronteira a empregar no modelo. Este tipo de condições fronteira são necessárias na secção de jusante para definir os níveis de água na secção de jusante do modelo em função dos caudais turbinados ou bombados. Consequentemente, as curvas de vazão utilizadas correspondem às obtidas para a confluência do Rabagão com o Cávado, secção fronteira de jusante do modelo, para casos de turbinamento, das quais é apresentado como exemplo na figura seguinte.

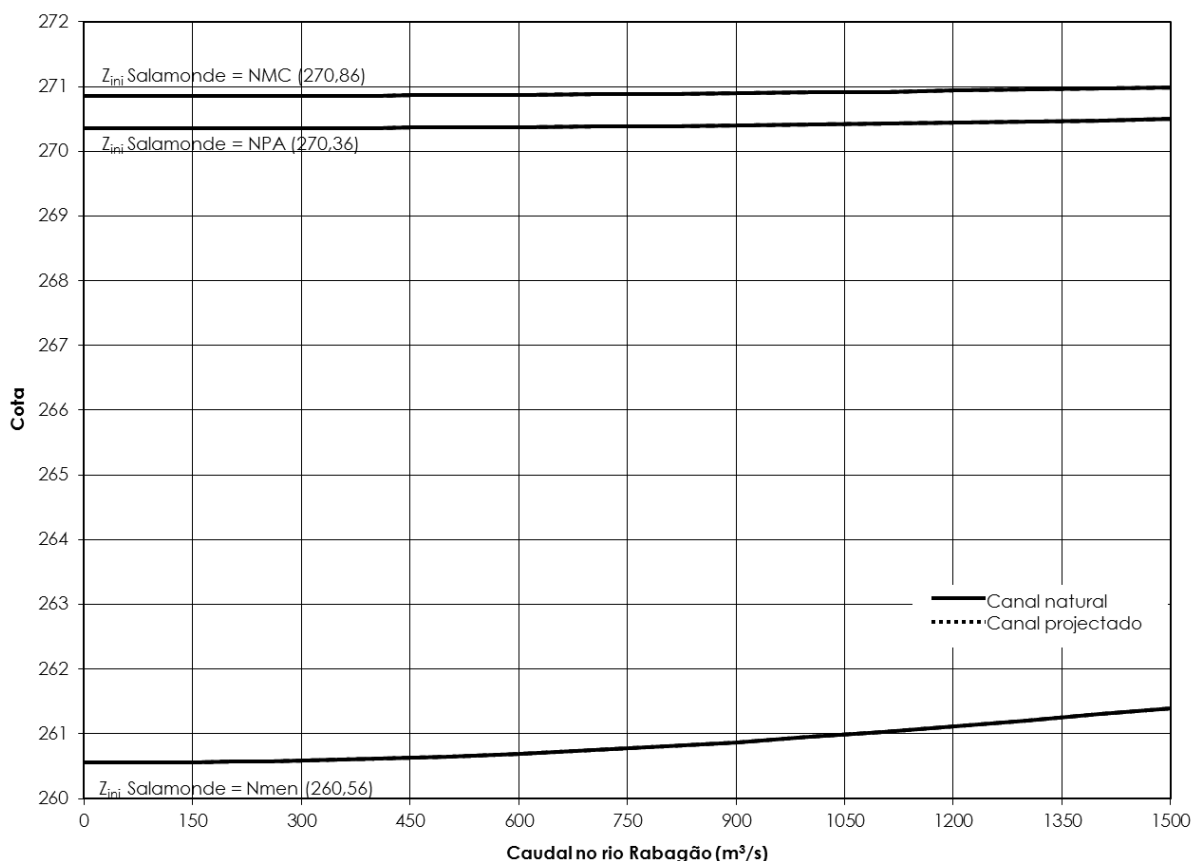


Figura 15 – Curvas de vazão para a confluência do Rabagão com o Cávado para um caudal no rio Cávado de 0 m³/s (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2009d)

Como é perceptível pela análise da Figura 15, para condições de exploração ao NPA e ao NMC, apenas para caudais superiores a 400 m³/s se faz sentir a alteração da altura de água na albufeira. Como o caudal máximo de turbinamento é de 250 m³/s, para simulações em que não seja considerada uma cheia no rio Rabagão, a informação a introduzir para a condição fronteira consiste num nível da superfície livre estático com o tempo.

Para níveis superiores ao Nmen a ocorrência de caudais inferiores a 250 m³/s na confluência do Rabagão com o Cávado não interfere com os níveis de água na albufeira, pelo que os casos indicados acima não sofrem alterações.

Para níveis inferiores ao Nmen a informação existente para determinação de curvas de vazão corresponde aos resultados das simulações efetuadas em modelos hidrodinâmicos unidimensionais na

fase de projeto do reforço de potência de Venda Nova III, disponíveis no Aditamento ao Projeto (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2009d).

Esta informação encontra-se apresentada na forma de gráficos de variação de níveis em locais específicos da albufeira de Salamonde durante operações de turbinamento e bombagem. A Figura 16 serve de exemplo para um caudal de bombagem de 200 m<sup>3</sup>/s.

O modo de obtenção das curvas de vazão corresponde à determinação da diferença de cotas entre a secção da confluência dos rios e a secção da barragem de Salamonde para os diferentes cenários quando o nível junto à barragem de Salamonde se encontra aos níveis de funcionamento estipulados. Este é o procedimento para a determinação das curvas de vazão em situações de bombagem, dado não existirem disponíveis curvas de vazão para escoamentos rio acima.

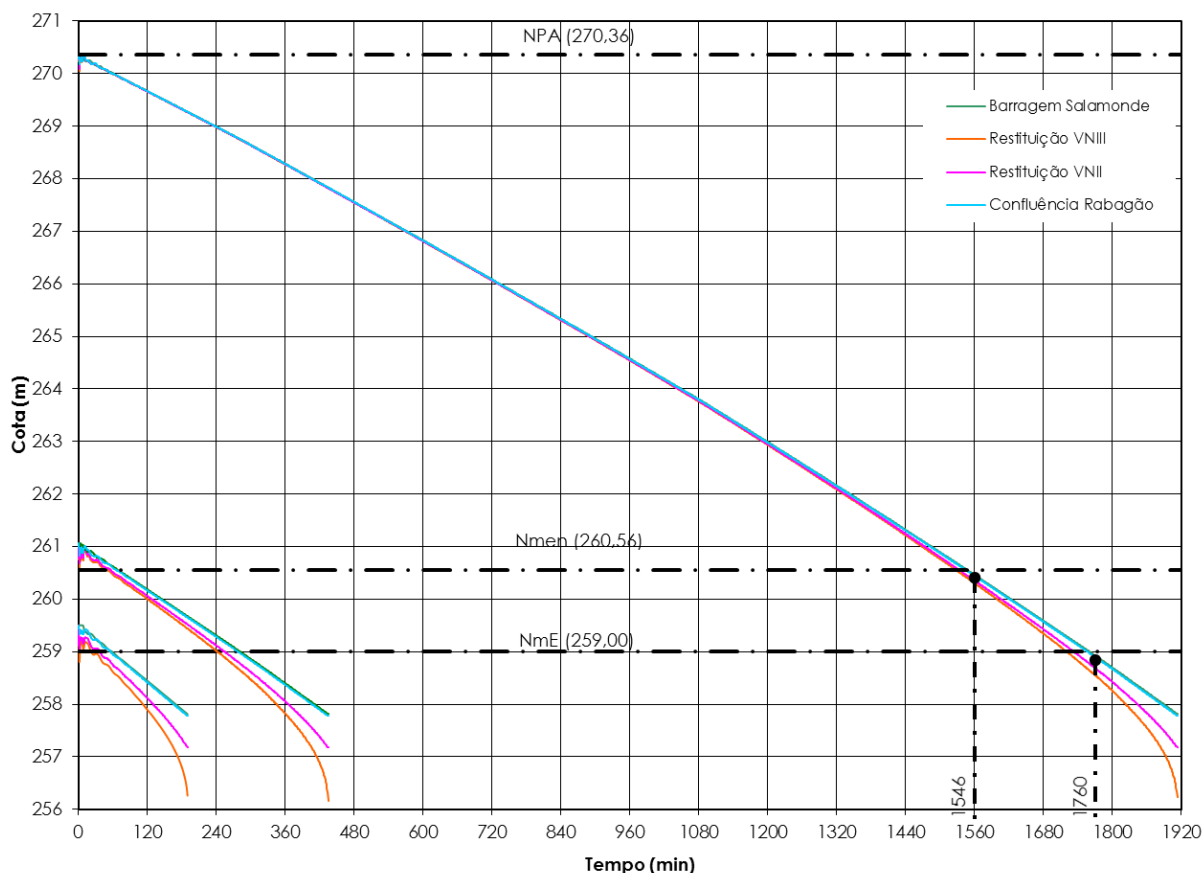


Figura 16 – Condições de escoamento em bombagem de dois grupos em VN II e VN III (EDP Gestão da Produção de Energia S.A., 2009d)

Como se pode verificar na Figura 16, a diferença de níveis entre a confluência do Rabagão e a barragem de Salamonde (linhas azul e verde, respetivamente) não é visualmente perceptível, pois é muito pequena. Como os modelos a utilizar no presente trabalho não possuem precisão ao milímetro, para situações em que não ocorre cheia no rio Rabagão as condições fronteira que se impõem ao cálculo serão:

- Uma altura da superfície livre constante com o tempo,  $h(t)=\text{constante}$ ;
- Uma curva de vazão que contenha um ponto tal que à altura da superfície livre do cenário a simular corresponda o somatório dos caudais turbinados ou bombados nos dois aproveitamentos.



### 3.4.5. DADOS PARA ANÁLISE DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Enumerados em 2.5., os dados necessários para efetuar as simulações de transporte de sedimentos são a dimensão das partículas ( $D_{50}$ ), a porosidade e o ângulo de atrito interno do material que constitui as margens e o fundo do canal.

Os dados disponíveis sobre a sedimentologia da zona de estudo correspondem a estudos levados a cabo pela TEIXEIRA DUARTE, S.A., encomendados no âmbito do primeiro reforço de potência de Venda Nova (II).

Os estudos correspondem a amostras de solo retiradas de 20 furos de sondagem de vários locais da albufeira de Salamonde e a ensaios de peneiração em laboratório. Destes ensaios foram selecionados solos até 3 metros de profundidade e analisadas as respetivas curvas granulométricas. Apresenta-se na Figura 17 uma das curvas para uma amostra da curva do rio Rabagão (zona a montante da restituição de Venda Nova III) entre 0.65 e 1.00 metros de profundidade.

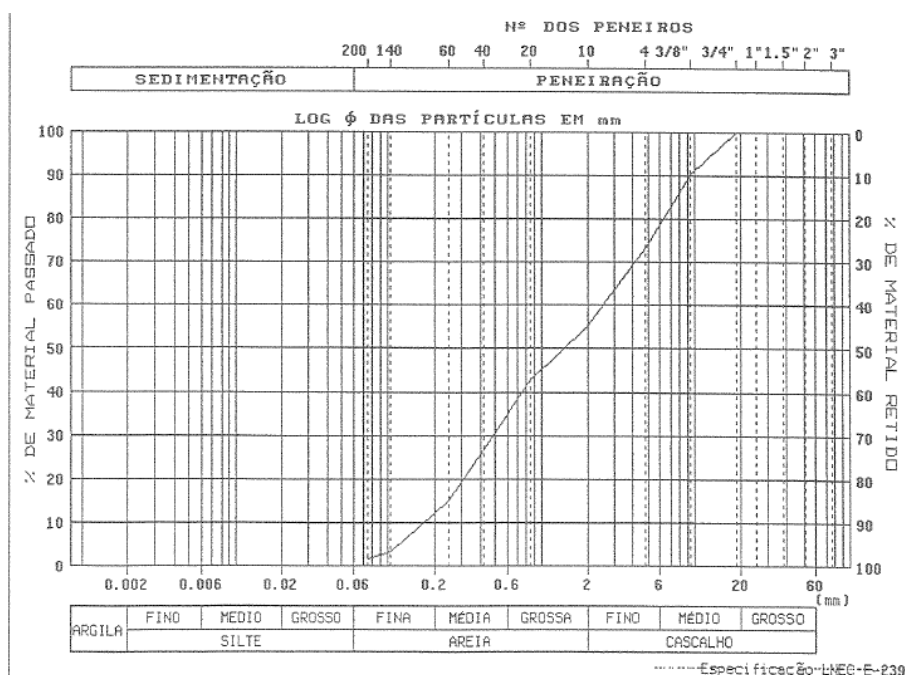


Figura 17 – Exemplo de curva granulométrica obtida para solos da albufeira de Salamonde (TEIXEIRA DUARTE Engenharia e Construções S.A., 1998)

A análise de várias destas curvas e o cálculo do valor médio para o  $D_{50}$  permitiu chegar a um valor de 1 milímetro para esta variável a utilizar no cálculo.

Tratando-se sobretudo de areias bem graduadas, foi escolhido o valor para o ângulo de atrito interno das partículas de  $30^\circ$  e um valor para a porosidade de 0.4 (Fernandes, 2012).





# 4

## CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Este capítulo contém a informação relativa aos estudos realizados durante a elaboração do projeto e durante a obra do segundo reforço de potência de Venda Nova. Destes estudos foram retiradas as informações necessárias para a definição dos cenários a simular para realizar a calibração e validação dos modelos numéricos. São apresentados todos os cenários que foram testados e da razão pela qual estes foram os escolhidos. Com esta informação é possível executar simulações de calibração e validação nos modelos numéricos a utilizar no capítulo seguinte.

### 4.1. ESTUDOS REALIZADOS E CONCLUSÕES RETIRADAS DOS RESULTADOS

No âmbito do projeto do canal de restituição e da chaminé de equilíbrio de montante do circuito hidráulico desenvolvidos pela EDP, foram realizados ensaios em modelo reduzido no laboratório de hidráulica do grupo ARTELIA em Grenoble (ARTELIA, 2013a, 2013b). No que diz respeito ao canal de restituição, os estudos consistiram na simulação de vários cenários de exploração dos aproveitamentos e na análise do comportamento do escoamento ao longo da zona de estudo.

Os relatórios publicados em abril de 2013, referentes ao primeiro conjunto de ensaios realizados, contém resultados de ensaios hidrodinâmicos onde não foi considerada a manutenção de parte da ensecadeira da obra de restituição de Venda Nova III, e resultados de ensaios morfodinâmicos, ou seja, com a presença de sedimentos. Em ambos os dois tipos de ensaios foram simulados cenários com o funcionamento simultâneo de ambos os aproveitamentos ou com o funcionamento apenas do aproveitamento de Venda Nova III, considerando os caudais instalados nos grupos para os três níveis de funcionamento definidos em 3.4.3. e para situações com e sem caudal afluente no rio Rabagão.

O caudal afluente à zona de estudo a modelar proveniente da albufeira de Venda Nova corresponde apenas ao caudal ecológico descarregado por um dispositivo preparado para tal funcionamento. O valor deste caudal é muito pequeno quando comparado com os caudais instalados nos reforços de potência de Venda Nova e por isso, pode ser desprezado na definição dos cenários.

Sendo espectável que em situações de cheia no rio Rabagão ambos os aproveitamentos funcionem apenas em turbinamento, o estudo de operações de turbinamento e bombagem em simultâneo em cenários de cheia não tem interesse. Deste modo, serão utilizados como cenários de calibração os casos em que existem resultados em modelo reduzido, sem caudal no rio Rabagão.

A necessidade da análise de transporte de sedimentos em modelo reduzido ocorreu, essencialmente, devido à exploração das minas da Borralha. As instalações desta indústria localizam-se a montante da

barragem de Venda Nova, adjacentes a um pequeno afluente do rio Rabagão, e destinavam-se à exploração de volfrâmio. As minas deixaram de ser exploradas em 1986 e após o fecho das operações houve um colapso em algumas das estruturas remanescentes que ocasionou o transporte de volume de sedimentos apreciável para a zona de estudo.

Com a possibilidade de haver um acontecimento semelhante e com a existência de zonas de fundos móveis é necessário efetuar estudos que simulem o transporte de sedimentos para precaver situações de entrada de sedimentos nas tomadas de água em bombagem.

Os estudos realizados em modelo reduzido permitiram concluir que, se tiver ocorrido deposição de sedimentos provenientes de montante do canal, para o NmE (nível mínimo extraordinário-259.00) há entrada de sedimentos nas estruturas de restituição durante operações de bombagem e que para o NPA o transporte de sedimentos é praticamente nulo. Para o Nmen (nível mínimo de exploração normal-260.56) verifica-se entrada de sedimentos na estrutura de restituição de Venda Nova III, mas apenas quando o nível do fundo atinge um nível próximo da crista do lábio da estrutura. Este movimento é muito lento e apenas acontece para as partículas sedimentadas de menor dimensão, por arrastamento das mesmas.

Como haverá possibilidade de entrada de sedimentos ao NmE e porque as velocidades no canal são elevadas, foi concluído que as operações de turbinamento e bombagem em simultâneo não deverão ocorrer abaixo do Nmen (ARTELIA, 2013a). Por isso, apenas haverá necessidade de simular cenários para níveis iguais ou superiores ao Nmen até que não se verifique entrada de sedimentos para a estrutura de restituição.

## **4.2. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO**

Os diferentes cenários a simular foram definidos tendo em conta os ensaios em modelo reduzido anteriormente realizados, bem como pelas operações previstas para o aproveitamento.

O objetivo deste trabalho é simular operações de turbinamento e bombagem em simultâneo. Neste último caso, e atendendo ao facto de não ser espetável a ocorrência desse modo de funcionamento em situações de cheia no rio Rabagão, as simulações efetuadas não considerarão a afluência de caudal no rio Rabagão à zona de restituição.

Os níveis de água a testar correspondem ao NPA, Nmen e NmE na secção limite de jusante da zona de estudo a modelar. Salienta-se que as análises correspondem a cenários com níveis estáticos, ou seja, não é simulado o enchimento ou esvaziamento da albufeira.

Os caudais a simular nos diferentes cenários (Quadro 1) correspondem a uma conjugação dos caudais instalados nos dois aproveitamentos para as operações de bombagem e turbinamento nos referidos aproveitamentos.

Quadro 1 – Caudais instalados ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) nos aproveitamentos em estudo

Modo de Operação	Aproveitamento	
	Venda Nova III	Venda Nova II
<b>Turbinamento</b>		
1 grupo	100	25
2 grupos	200	50
<b>Bombagem</b>		
1 grupo	80	20
2 grupos	160	40

Os cenários encontram-se agrupados por tipo de operação e assim são apresentados de seguida e discutidos no capítulo dos resultados.

Os primeiros cenários correspondem apenas a operações de turbinamento, apenas no aproveitamento de Venda Nova III ou em ambos os aproveitamentos em simultâneo.

O segundo grupo de resultados é alusivo a operações de bombagem, com bombagem em ambos os aproveitamentos ou apenas em Venda Nova III. De notar que não foram realizados estudos do funcionamento apenas de Venda Nova II porque tais cenários já foram estudados durante a fase de projeto da referida obra e correspondem a operações correntes desde a entrada em funcionamento desse aproveitamento.

Os cenários incluídos nestes dois grupos correspondem aos cenários simulados em modelo reduzido e que por essa razão foram utilizados para validação dos resultados obtidos nos modelos numéricos.

Destaca-se que os cenários em que há apenas bombagem de um dos grupos de Venda Nova III não foram referidos no relatório dos ensaios em modelo reduzido mas foram, ainda assim, testados com o objetivo de comparar os 2 modelos utilizados para cenários em que o caudal no canal é reduzido. Tais cenários ocorrem em operações de turbinamento e bombagem em simultâneo e por isso é necessário ter uma informação base do funcionamento dos dois modelos para este tipo de cenários.

O terceiro grupo de resultados consistiu em operações de bombagem e turbinamento em simultâneo. Foram simulados os diferentes modos de funcionamento de bombagem em Venda Nova III e turbinamento em Venda Nova II e vice-versa.

Para este grupo de cenários definiu-se, *a priori*, o nível mínimo de funcionamento correspondente ao Nmen, pelo que não foram simulados cenários ao NmE.

A análise dos resultados obtidos nestes cenários permitiu a avaliação da adequabilidade à exploração do sistema para os níveis da superfície livre situados entre os níveis simulados.

A principal restrição nas simulações de transporte de sedimentos é o tempo de cálculo, pois as equações a resolver são em maior número. Isto implica definir um menor número de cenários para estas simulações, comparativamente às simulações meramente hidrodinâmicas. Os cenários escolhidos foram, por isso, aqueles com um maior caudal no canal e para o Nmen. Se se detetasse a necessidade de simular

níveis intermédios para definir condições de funcionamento esses cenários seriam acrescentados à lista de cenários apresentada de seguida.

A calibração do modelo para simulações de transporte de sedimentos por arrastamento foi realizada de modo análogo ao processo utilizado para as simulações puramente hidrodinâmicas, através da comparação dos resultados obtidos neste estudo com aqueles obtidos em modelo reduzido. Como as simulações com transporte de sedimentos necessitam de maior capacidade de processamento, foi utilizado um computador com a capacidade de executar um elevado número de simulações em simultâneo, com o objetivo de se conseguir efetuar todas as simulações necessárias.

As máquinas utilizadas para os dois tipos de simulações têm as seguintes especificações:

Quadro 2 – Especificações das máquinas utilizadas para efetuar as simulações

<b>Componente da máquina</b>	<b>Máquina utilizada para simulações com transporte de sedimentos</b>	<b>Máquina utilizada para simulações sem transporte de sedimentos</b>
<b>Processador</b>	Intel Xeon CPU E5-2687W v3 @ 3.10 GHz	Intel Core i5-2400 CPU @ 3.10GHz
<b>Memória Instalada</b>	128 GB	16.0 GB
<b>Tipo de Sistema Operativo</b>	64 bit	64-bit

O código de cada cenário é do tipo R0\_NPA\_TIII200\_BII40, em que os 4 grupos de símbolos correspondem:

- RX-caudal existente no rio Rabagão ( $\text{m}^3/\text{s}$ );
- NPA-nível da água na secção da fronteira de jusante do sistema (m);
- TIIIXXX-modo de funcionamento do aproveitamento hidroelétrico. II ou III refere-se ao reforço de potência de Venda Nova II ou III, respetivamente. T significa modo de turbinamento e B modo de bombagem. O número acoplado à letra corresponde ao caudal de funcionamento ( $\text{m}^3/\text{s}$ );
- O exemplo acima corresponde a um cenário em que o caudal no rio Rabagão é nulo, o nível a jusante é o NPA (270.36), Venda Nova III está a turbinar  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  e Venda Nova II a bombear  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 4.2.1. OPERAÇÕES DE TURBINAMENTO E BOMBAGEM

O conjunto de cenários a testar para estas operações, de calibração dos modelos numéricos, apresenta-se no Quadro 3:

Quadro 3 – Cenários de simulação de calibração/ validação dos modelos

Modo de Operação	Nível do cenário						Código do cenário	Designação do Apêndice
	NPA		Nmen		NmE			
	VNIII	VNII	VNIII	VNII	VNIII	VNII		
Turbinamento	200	50	-	-	-	-	R0_NPA_TIII200_TII50	A1
	-	-	200	50	-	-	R0_Nmen_TIII200_TII50 <sup>1</sup>	A1
	-	-	-	-	200	50	R0_NmE_TIII200_TII50 <sup>1</sup>	A1
	200	0	-	-	-	-	R0_NPA_TIII200_TII0	A2
	-	-	200	0	-	-	R0_Nmen_TIII200_TII0	A2
	-	-	-	-	200	0	R0_NmE_TIII200_TII0	A2
Bombagem	-160	-40	-	-	-	-	R0_NPA_BIII160_BII40	A3
	-	-	-160	-40	-	-	R0_Nmen_BII160_BII40 <sup>1</sup>	A3
	-	-	-	-	-160	-40	R0_NmE+0.5* <sub>BIII160_BII40</sub>	A3
	-160	0	-	-	-	-	R0_NPA_BIII160_BII0	A4
	-	-	-160	0	-	-	R0_Nmen_BIII160_BII0 <sup>1</sup>	A4
	-	-	-	-	-160	0	R0_NmE_BIII160_BII0	A4
	-80	0	-	-	-	-	R0_NPA_BIII80_BII0	A5
	-	-	-80	0	-	-	R0_Nmen_BIII80_BII0 <sup>1</sup>	A5
	-	-	-	-	-80	0	R0_NmE_BIII80_BII0	A5

Notas referentes ao Quadro 3:

\*Devido a dificuldades de simulação simulou-se à cota (259.50).

1 -Cenários com análise de transporte de Sedimentos.

#### 4.2.2. OPERAÇÕES DE TURBINAMENTO E BOMBAGEM EM SIMULTÂNEO

A análise dos cenários de turbinamento/bombagem em simultâneo segue um conjunto de manobras definidas pelo autor do trabalho por questões de organização, apresentadas no Quadro 4. Define-se uma sequência de operações em que, de um cenário para outro apenas há alteração do funcionamento de um dos quatro grupos dos dois aproveitamentos.

Quadro 4 – Número de grupos em funcionamento

Ordem de cenários	Venda Nova II	Venda Nova III
1º	1	2
2º	2	2
3º	2	1
4º	1	1

Os cenários de operações de turbinamento e bombagem em simultâneo são apresentados no Quadro 5:

Quadro 5 – Cenários de simulação de operações de turbinamento e bombagem

Modo de Operação	Nível do cenário						Código do cenário	Designação do Apêndice
	NPA		Nmen		265			
	VNIII	VNII	VNIII	VNII	VNIII	VNII		
Bombagem VNIII  Turbinamento VNII	-160	25	-	-	-	-	R0_NPA_BIII160_TII25	B1
	-	-	-160	25	-	-	R0_Nmen_BIII160_TII25 <sup>1</sup>	B1
	-160	50	-	-	-	-	R0_NPA_BIII160_TII50	B2
	-	-	-160	50	-	-	R0_Nmen_BIII160_TII50 <sup>1</sup>	B2
	-	-	-	-	-160	25	R0_265_BIII160_TII25 <sup>1</sup>	B3
	-	-	-	-	-160	50	R0_265_BIII160_TII50 <sup>1</sup>	B3
	-80	50	-	-	-	-	R0_NPA_BIII80_TII50	B4
	-	-	-80	50	-	-	R0_Nmen_BIII80_TII50	B4
	-80	25	-	-	-	-	R0_NPA_BIII80_TII25	B5
	-	-	-80	25	-	-	R0_Nmen_BIII80_TII25	B5
Turbinamento VNIII  Bombagem VNII	200	20	-	-	-	-	R0_NPA_TIII200_BII20	B6
	-	-	200	20	-	-	R0_Nmen_TIII200_BII20 <sup>1</sup>	B6
	200	40	-	-	-	-	R0_NPA_TIII200_BII40	B7
	-	-	200	40	-	-	R0_Nmen_TIII200_BII40 <sup>1</sup>	B7
	100	40	-	-	-	-	R0_NPA_TIII100_BII40	B8
	-	-	100	40	-	-	R0_Nmen_TIII100_BII40	B8
	100	20	-	-	-	-	R0_NPA_TIII100_BII20	B9
	-	-	100	20	-	-	R0_Nmen_TIII100_BII20	B9

Notas referentes ao Quadro 5:

1 – Cenários com análise de transporte de sedimentos por arrastamento.

### 4.3. CONDIÇÕES FRONTEIRA

Estas condições correspondem à informação necessária para a circunscrição do domínio do escoamento a considerar de modo a que se consiga simular num espaço reduzido fenómenos que decorrem e/ou se propagam para o interior do domínio de cálculo. No caso de estudo existem 4 secções que funcionam como fronteiras do sistema:

- Restituição de Venda Nova III;
- Restituição de Venda Nova II;
- Fronteira de montante no rio Rabagão;
- Confluência do rio Rabagão com o rio Cávado.

A condição de fronteira na secção de montante no rio Rabagão corresponde a uma curva de caudais cronológicos,  $Q(t)$ . Isto significa que o caudal proveniente do rio Rabagão é um dado da simulação: para o estudo em questão, não é relevante simular condições de cheia, pois, como já referido em 4.1 os cenários de operações de turbinamento/bombagem em simultâneo não deverão ocorrer durante períodos de cheia.

Nas obras de restituição, as condições fronteira também correspondem a funções do tipo  $Q(t)$  que representam o funcionamento em turbinamento ou bombagem dos dois aproveitamentos hidroelétricos.

Na fronteira de jusante da zona de estudo o escoamento é caracterizado por curvas de vazão,  $Q(h)$ , que foram alvo de estudo na fase de projeto do aproveitamento. As curvas de vazão traduzem os níveis da albufeira que se verificam para os diversos caudais, quer bombados, quer turbinados, para esta secção. Como já foi referido (3.4.4. Curvas de Vazão) as condições fronteira utilizadas na fronteira de jusante têm como objetivo obter o nível da superfície livre constante com o tempo, podendo-se definir esta condição de duas formas:

- Impor uma curva de vazão ao longo da fronteira de jusante do modelo, o que implica definir um conjunto de pontos fictícios, com o objetivo de atingir o ponto de estabilização do modelo tal que o nível da superfície livre (igual ao nível estático do cenário) corresponda à resultante dos caudais turbinados e bombados nos dois aproveitamentos;
- Impor uma condição  $h(t)$ , com  $h$  igual a uma altura da superfície livre uma constante com o tempo. A diferença entre esta condição e a anterior é que a primeira permite que haja entrada e saída de caudal pela condição fronteira simultaneamente.

A entrada em funcionamento dos grupos também é simulada nos programas através do uso de condições fronteira. Pretende-se realizar um estudo de uma configuração estabilizada do escoamento no canal e por isso, a definição do tempo que demora para um grupo passar de situação de paragem até ao funcionamento com o caudal instalado não tem influência nos resultados finais. Definiu-se um intervalo de tempo de 30 segundos para um grupo passar de um caudal nulo até ao caudal instalado, quer em modo de bombagem quer em modo de turbinamento.

#### **4.4. CRITÉRIOS DE SIMULAÇÃO**

Os seguintes critérios corresponderam às linhas orientadoras seguidas no processo de obtenção de resultados em ambos os modelos numéricos utilizados, com vista a definir o instante de representação dos referidos resultados.

O instante de paragem de simulação foi então definido atendendo aos seguintes critérios:

- Uma simulação deverá ser executada até um instante de tempo em que, entre 3 instantes de tempo consecutivos, não haja alteração dos valores das variáveis altura do escoamento e velocidade total em todo o domínio de cálculo superior a 0.01 metros e a metros por segundo, respetivamente, quando se verifique que há convergência para uma situação estável;
- Quando se verifique que não há estabilização dos resultados numa configuração única do modelo, pode-se interromper a simulação se se comprovar que ocorre um ciclo na configuração do escoamento. Nesse caso, deve-se indicar que não houve estabilização do modelo e apresentar os resultados do ou dos instantes em que se verificam as condições mais gravosas;
- O tempo mínimo de simulação em ambos os modelos corresponde a 3600 segundos (1 hora).



## 5

**DEFINIÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO**

Neste capítulo descreve-se todo o processo de elaboração dos modelos numéricos a utilizar para os cálculos dos cenários estabelecidos no capítulo anterior. São apresentados os passos desde a criação de uma malha triangulada provisória do terreno até à obtenção da malha final, expondo-se as alterações efetuadas e os respetivos motivos. O fundamental a reter deste capítulo é a compreensão das limitações e potencialidades dos programas de cálculo utilizados e o porquê da utilização de uma malha triangulada ainda que menos precisa que outras possíveis. Com a definição final do modelo computacional a utilizar é possível concluir se e porque a malha escolhida é adequada, com resultados compatíveis com o modelo reduzido, para o caso de estudo e que o passo temporal de cálculo é o aceitável para simular todos os cenários estipulados.

**5.1. CONCEÇÃO DO MODELO FÍSICO**

A topografia do terreno é inserida nos programas de cálculo tendo como base um ficheiro de texto ASCII, que depois é lido e transformado em modelo digital do terreno.

Este ficheiro ASCII não corresponde ao código binário que lhe dá o nome mas sim a um formato corporativo utilizado pela ESRI. Este ficheiro é constituído por uma matriz de dados, em que cada célula (quadrada) da matriz possui um valor referente à grandeza que se queira representar, neste caso a cota. Apenas se definem as coordenadas da célula do canto inferior esquerdo, o número de linhas e colunas, a dimensão do lado das células e o valor a atribuir às células sem dados (que, por defeito, é -9999).

Partindo do ficheiro correspondente ao desenho da topografia da zona em estudo, (apresentado antes na Figura 14) é indispensável processar a informação de modo a transformar os dados para um ficheiro ASCII.

Este processo mostrou-se, em geral, complicado por várias razões, nomeadamente no caso em estudo: tornou-se necessário transformar um conjunto de estruturas claramente tridimensionais (obras de restituição) para um ficheiro de dados que as caracterizasse com o maior rigor possível, em duas dimensões; não é possível obter planos verticais, devido a limitações do ARCMAP 10.4, a apresentar de seguida; É crucial que o ficheiro de desenho possua limites bem definidos e que não haja cruzamento ou incoerência de curvas de nível ou de intersecção de planos. Por esta razão, todos os planos verticais existentes nas estruturas foram ligeiramente alterados através do desfasamento de uma das linhas em poucos centímetros relativamente à sua posição original, verificando se não se alterava significativamente a geometria das estruturas de restituição.

O programa computacional utilizado para a transformação de dados foi o ARCMAP 10.4, da empresa ESRI. O programa permite a criação de uma malha triangular, referida comumente por TIN (*Triangulated Irregular Network*), que une os pontos e linhas do ficheiro de desenho criado em Autocad e interpola os valores das cotas de cada vértice do triângulo de modo a criar um modelo matemático com valores da altitude dos pontos notáveis do leito e margens.

Uma TIN é uma estrutura digital constituída por múltiplos triângulos que representam a topografia do terreno. Os vértices dos triângulos consistem em pontos do terreno que possuem informação relativa à posição do mesmo nos 3 eixos definidos para o problema.

Os lados dos triângulos são contíguos e por isso representam uma malha contínua do terreno. Como os nós se encontram distribuídos de forma irregular no terreno, a TIN possui maior detalhe em zonas com maior concentração de pontos e/ou mais declive (ESRI, 2016), daí constituir uma *Triangulated Irregular Network*.

A TIN, não pode ser utilizada diretamente no GUAD 2D, apesar de no IBER ser possível essa operação. Por isso, a TIN é transformada num RASTER, que consiste na representação gráfica da matriz de dados do ficheiro ASCII, através da transformação da informação da malha triangular na relativa a uma malha quadrada, com cada quadrícula a corresponder a um valor de altitude.

A dimensão das quadrículas da matriz é crucial na precisão do processo: a representação de uma certa área através de uma matriz com poucos elementos terá menor precisão que a mesma representação utilizando uma matriz com maior número de elementos, que evita uma maior perda de informação (Figura 18). No entanto, o emprego de uma matriz maior acarreta uma maior capacidade de processamento computacional. Assim, é necessário ter em conta qual a precisão suficiente para representar bem um certo fenómeno, de modo a não haver perda de informação necessária e que o tempo de processamento não seja em demasia.

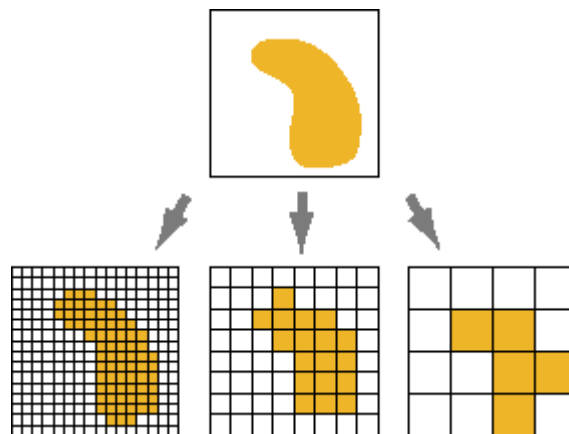


Figura 18 – Descrição do espaço numa malha quadrática (ARCGIS 9.2 Desktop Help)

De acordo com o referido, definiu-se uma gama de dimensões a respeitar para a definição da área de cada célula de uma matriz. Para esta escolha foi determinante a largura média do canal, o comprimento do mesmo, a complexidade da batimetria e os resultados obtidos em modelo reduzido.

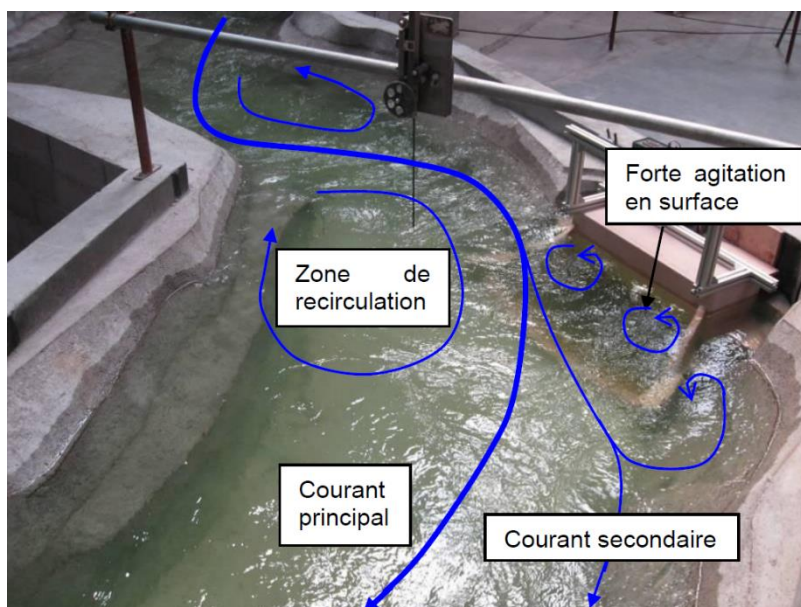


Figura 19 – Condições de escoamento para uma cheia de 660 m<sup>3</sup>/s no rio Rabagão para o Nmen nos ensaios em modelo reduzido (ARTELIA, 2013b)

Como se pode observar na Figura 19, ao longo de uma curta extensão da zona de estudo ocorrem fenómenos complexos, e em locais com uma largura inferior a um metro no protótipo, como é o caso da área adjacente aos muros ala das obras de restituição. Estes fenómenos podem influenciar o modo como o escoamento se processa.

Após a análise dos resultados dos ensaios em modelo reduzido, definiram-se as seguintes potenciais dimensões para as células de uma malha:

- 0.25x0.25 m<sup>2</sup>;
- 0.50x0.50 m<sup>2</sup>;
- 1.00x1.00 m<sup>2</sup>;
- 1.50x1.50 m<sup>2</sup>;

Foi ainda definida uma malha com células de dimensão 2.00x2.00 m<sup>2</sup> para utilização de condições fronteira e de cenários de estudo, de modo a compreender o funcionamento dos programas através de um modelo com um tempo de cálculo curto.

O uso destas malhas foi alvo de um estudo de sensibilidade, de modo a avaliar qual ou quais as malhas a empregar no estudo.

A etapa final da edição da topografia consistiu em transformar o RASTER para um ficheiro ASCII com informação de localização e de dimensão da célula para que possa ser decodificado, por qualquer dos dois modelos computacionais utilizados, o GUAD 2D e o IBER.

A fase seguinte consistiu na inserção da informação da topografia nos dois referidos modelos computacionais.

## 5.2. DESCRIÇÃO DO SOFTWARE UTILIZADO

### 5.2.1. MODELO GUAD 2D

Esta ferramenta computacional é propriedade do grupo espanhol INCLAM, S.A., sediado em Madrid e em Barcelona, e que possui uma delegação norte sediada em Saragoça. Nesta cidade, na Universidade de Saragoça, existe uma equipa de trabalho que tem desenvolvido modelos numéricos com base em métodos de volumes finitos, e foi com base nesses modelos, que a equipa liderada pelos investigadores Pilar García Navarro, Pilar Brufau e Javier Murillo desenvolveu os modelos matemático e físico que são a base do software.

O GUAD 2D é composto por três módulos: CREATOR, VIEW e GUI.

O CREATOR é a ferramenta utilizada para a conceção do modelo físico, através da:

- Modelação do terreno com base num ficheiro ASCII da ESRI;
- Caracterização da rugosidade do leito e margens;
- Definição das condições de fronteira do sistema;
- Definição das condições iniciais (nível inicial da água e velocidade);
- Definição do passo temporal da obtenção de resultados.

O GUAD CREATOR funciona como uma ferramenta GIS (Sistema de Informação Geográfica) que permite a configuração de um modelo numérico especializada para escoamentos bidimensionais. A interface deste módulo, apresentada na Figura 20, é de fácil manuseamento:

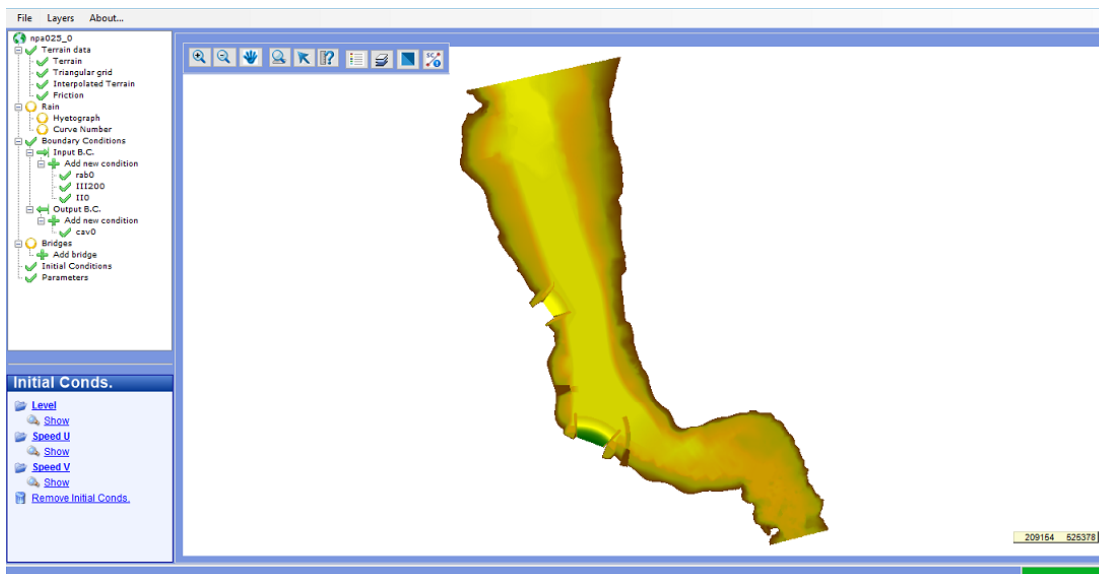


Figura 20 – Interface do GUAD CREATOR após introdução da informação relativa ao terreno.

O processo de obtenção de um ficheiro de cálculo passa por 6 fases:

A primeira fase corresponde à importação do ficheiro de dados que define a topografia da zona de estudo. Sobre a topografia são inseridas as informações necessárias para uma simulação hidrodinâmica.

A segunda fase corresponde à definição das condições fronteira. Este passo consiste na definição das condições de entrada no sistema (*input*), do tipo  $Q(t)$  ou  $h(t)$ , ou seja, o caudal de água que entra no sistema ou a altura de água no canal de escoamento em cada instante de tempo. Estas condições são implementadas em secções que definem a fronteira do modelo, como por exemplo a secção de montante de um rio ou a secção inicial de uma obra de restituição em turbinamento, caso da Figura 21.

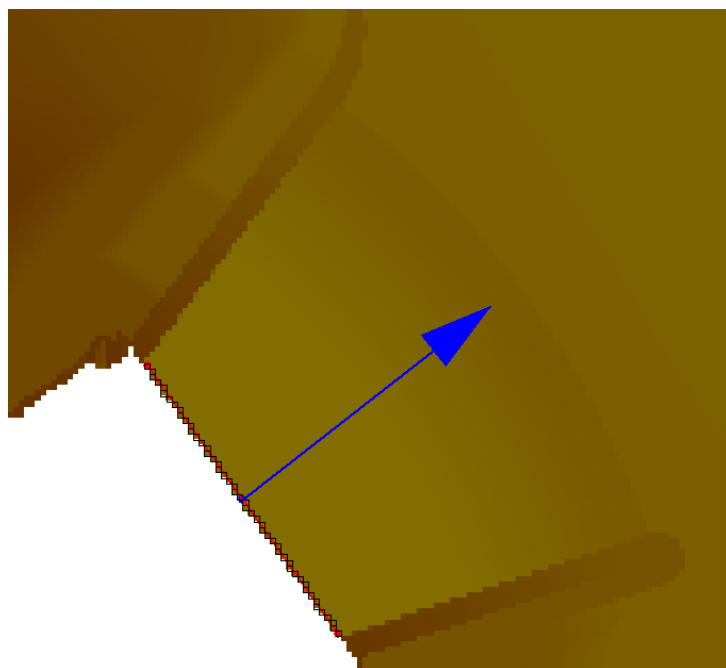


Figura 21 – Definição de uma condição fronteira de entrada no GUAD CREATOR: definição das células e da direção do escoamento

As condições de saída de água no sistema, *output*, podem ser não só do mesmo tipo das condições de entrada, mas também definidas através da relação  $Q(h)$  ou correspondentes a um escoamento crítico, ou seja, a partir da definição de uma curva de vazão de uma dada secção ou admitindo a presença de uma estrutura que faça com que o escoamento seja crítico, ou seja  $Fr=1$ , na zona de saída. Estas condições são impostas na secção de jusante de um rio ou numa secção de uma tomada de água.

O próximo (3º) passo corresponde à triangulação do terreno da zona a estudar. A malha quadrada que define o terreno é dividida em triângulos aos quais, para além da informação geográfica, é adicionada informação relativa às variáveis de cálculo. É necessário definir a dimensão máxima do triângulo e o erro máximo de diferença de cotas:

- A dimensão máxima do lado dos triângulos deverá permitir que, em caso de haver uma continuidade no plano da malha (por exemplo uma extensão plana), que a concentração de triângulos nessa continuidade seja menor, permitindo diminuir o tempo de cálculo sem uma grande perda de informação;
- A diferença máxima de cota é aplicada ao terreno triangulado, ou seja, a altitude de um elemento da malha não pode ser desfasada, em relação à altura presente no mesmo espaço na topografia inserida, de um valor corresponde ao definido. Deste modo, as zonas de maior declive são melhor representadas através de uma maior densidade de células.

Pôde concluir-se, através de estudos de sensibilidade, que quanto maior forem estes dois parâmetros, menor será o número de células do modelo, ainda que também ocorra diminuição da precisão do mesmo. Na definição daqueles parâmetros é necessário ter em conta a topografia existente e qual o grau de precisão que é exigido. Modelos com topografia mais complexa necessitam de estudos de sensibilidade para definição dos valores máximos dos referidos parâmetros, de modo a que se obtenha uma malha com um tempo de cálculo suficientemente curto mas também com rigor adequado na representação do terreno.



Na Figura 22 pode verificar-se que a definição adequada de parâmetros origina uma malha com maior concentração de células em zonas de grande declive e, em secções planas, com células de dimensão igual à máxima definida.

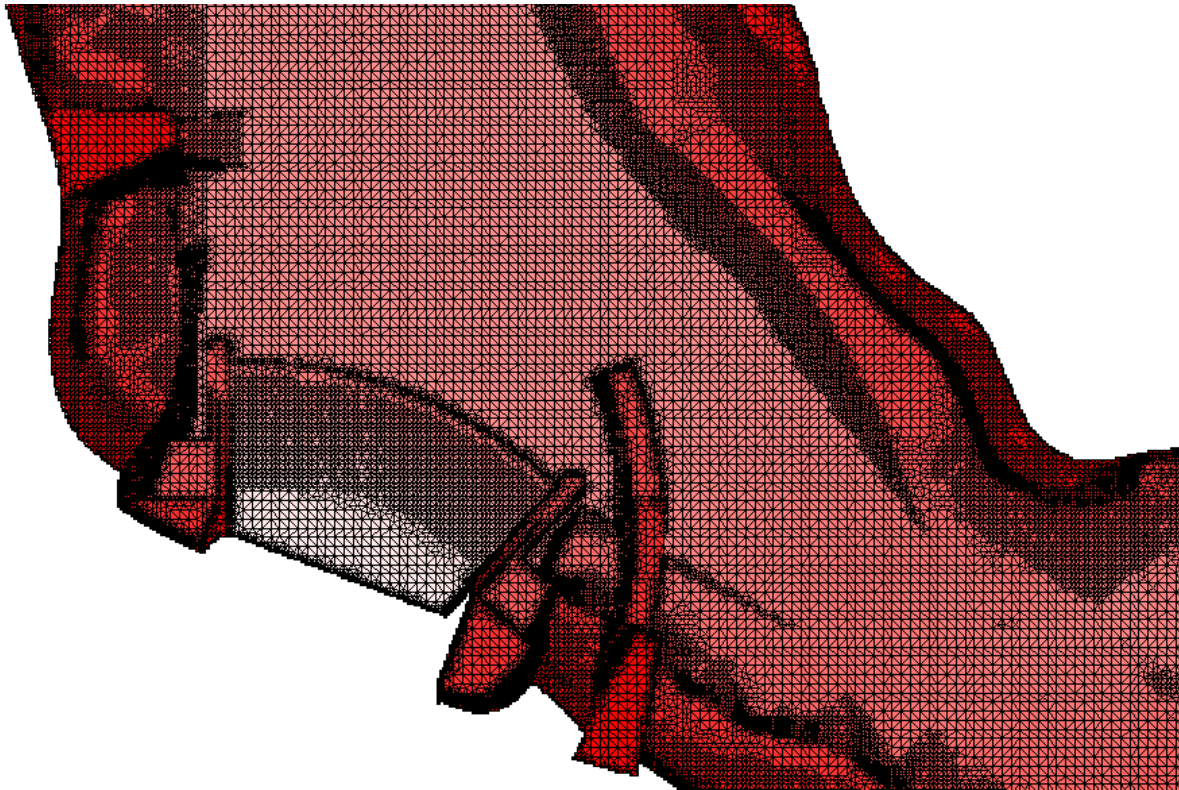


Figura 22 – Terreno triangulado na zona de restituição de Venda Nova III a partir de células de  $0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$  com células de dimensão máxima de 1 metro e com diferença máxima de cota de 0.2 metros.

Após efetuada a triangulação, o quarto passo consiste na inserção dos valores da rugosidade do leito e das margens. O GUAD 2D trabalha com a constante  $n$ , inversa do coeficiente de Manning. Pode ser introduzido um valor constante ou um valor para cada célula através de um ficheiro ASCII da ESRI.

O quinto passo corresponde à definição das condições iniciais do modelo. As mesmas podem corresponder a um nível de água inicial e velocidade nula ou a resultados de uma simulação anterior com a mesma malha. Esta última opção tira proveito da possibilidade de se fazer *backups* da simulação e assim ir guardando informações de cálculo para um instante de tempo. Esta possibilidade é uma mais valia porque o tempo de cálculo pode ser superior a vários dias, com a hipótese de haver uma falha não prevista, quer do computador, quer do programa de cálculo.

O sexto e último passo consiste na inclusão dos parâmetros de simulação. Neste caso, definem-se os instantes inicial e final da simulação e o passo de tempo para os quais há saída de resultados.

O GUAD CREATOR é, assim, uma ferramenta de fácil manuseamento e que possui uma interface amigável, dispondo de um único menu para a introdução da informação necessária para a simulação.

O GUI é a ferramenta de cálculo do conjunto: A introdução de um ficheiro criado no CREATOR, a definição de um ficheiro de saída e da sua respetiva localização no disco são os únicos passos anteriores ao cálculo. O GUI executa os cálculos matemáticos e retém os resultados das alturas de água, da resultante da velocidade e das respetivas componentes em direções ortogonais, e caudais para instantes

de tempo conforme o intervalo de saída de resultados definido no CREATOR e guarda-os num ficheiro único.

Esta ferramenta resolve o sistema de equações diferenciais apresentadas em (11) e (12) através de métodos de volumes finitos e permite o uso de 1 ou 2 processadores (na versão utilizada) para este processo, conforme o utilizador queira ou necessite de distribuir a capacidade de processamento por outras tarefas.

O VIEW funciona como interface visual de resultados: o ficheiro de resultados obtido através do GUI é apresentado graficamente, permitindo uma melhor interpretação dos resultados. O processo de obtenção de resultados consiste na seleção do(s) instante(s) de tempo para os quais se tenciona obter informação relativa às profundidades ou níveis de água e a velocidades do escoamento.

Tirando partido das funcionalidades GIS do *software*, é possível representar os módulos das velocidades e os níveis de água de cada célula por meio de graduação de cores que permite a identificação de locais com maior ou menor velocidade. A direção e sentido da velocidade são representados por meio de vetores, que correspondem à resultante das células que compõem o espaço por elas representado.

É possível fazer a representação de hidrogramas do desenvolvimento temporal do escoamento para qualquer secção da zona de estudo, assim como o perfil transversal do terreno, do nível de água e da velocidade para os instantes de tempo selecionados. Estes modos de representação das variáveis serão utilizados para a análise das condições de escoamento do sistema.

No entanto, esta ferramenta apenas serve para uma visualização e interpretação simples de resultados, porque os mapas de velocidade não possuem opções de tratamento de dados, os perfis não permitem a representação de múltiplas variáveis, e a interpretação é apenas visual, sendo impossível a obtenção de valores de grandezas.

A opção de exportar resultados para outros programas computacionais é a melhor alternativa para uma melhor interpretação dos resultados, quer em termos qualitativos, quer em termos quantitativos. É possível criar ficheiros ASCII que depois podem ser trabalhados em ARCMAP/ARCVIEW com mais e melhores funcionalidades.

Conclui-se que o VIEW preza pelo módulo simples de edição do modelo e pela opção de distribuição de processamento por parte do módulo de cálculo.

### 5.2.2. MODELO IBER

Este programa computacional, para além da ferramenta de cálculo, possui um módulo de edição de geometria, que serve de complemento para casos em que seja necessária uma pequena alteração à topografia. Deste modo não é necessário todo o processo de tratamento da informação num ficheiro de tamanho elevado para uma pequena modificação.

A interface inicial é mais complexa que a correspondente do GUAD 2D, mas também mais completa, isto é, possui mais funcionalidades. Desde logo, a importação de um ficheiro de informação de topografia pode ser efetuada de vários modos, sendo permitida a importação de um ficheiro através da criação de pontos, linhas ou superfícies. A criação de linhas e pontos é indicada para casos simples em que o utilizador queira fazer alterações à topografia ou criar as células manualmente, ou seja, para cenários em que o processo automático não funcione corretamente.

Salienta-se que, por experiência própria, a importação da topografia para linhas não é indicada para superfícies muito inclinadas, pois pode haver sobreposição de linhas no eixo vertical, o que origina erros no início do processo de cálculo.

O processo de importação da informação do terreno pode ser feito através da importação de uma TIN ou o programa consegue fazer a transformação de um ficheiro ASCII da ESRI numa TIN.

Esta opção facilita a criação de uma malha triangular automaticamente, partindo de um ficheiro de dados com dimensão de células especificada, onde podem ser introduzidas as mesmas condições inseridas no GUAD 2D para a execução de simulações.

Na criação de malha automática, as zonas mais inclinadas do terreno correspondem no IBER a uma maior densidade de triângulos, mas este processo, ao contrário do que acontece no GUAD 2D, não é controlado pelo utilizador, pelo que não se sabe como o programa efetua este processamento.

Como a conceção de uma TIN pode incluir falhas, como por exemplo, má ligação entre os triângulos e disparidade no tamanho dos mesmos, é necessária uma verificação tridimensional da malha de modo a evitar possíveis erros no caso de topografias complexas, como acontece nas obras de restituição dos aproveitamentos em estudo.

Podem-se detetar alguns desses erros na Figura 23 correspondente ao caso da estrutura de restituição de Venda Nova II:

- A vermelho – A linha de fronteira deve ser reta, pois o escoamento terá direção perpendicular à direção da fronteira. Se isso não acontecer, poderá haver um erro no modelo logo no instante inicial de uma simulação.
- A azul – Na criação da TIN, os dois pontos indicados não foram unidos devido a uma incorreta leitura do ficheiro ASCII, pelo que foi necessário fazer a união dos referidos pontos e criar a superfície indicada.

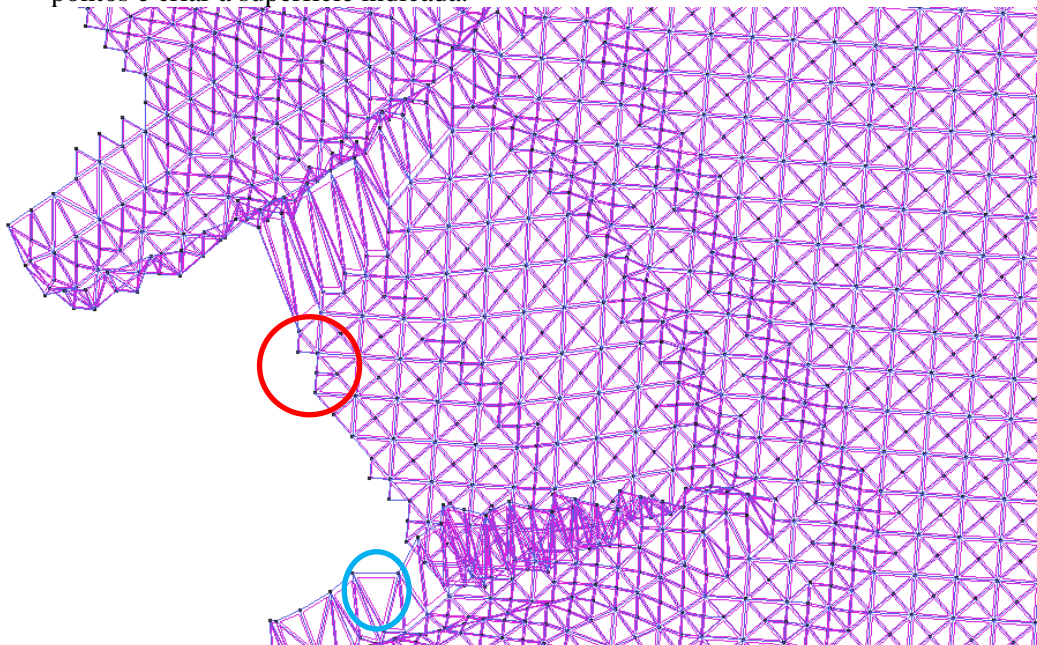


Figura 23 – Conjunto de superfícies da TIN criada pelo IBER



A introdução das condições fronteira, das condições iniciais e dos parâmetros de simulação processa-se de modo análogo referido para o GUAD 2D. Todavia, este modelo computacional possui funcionalidades adicionais, de que são exemplo os processos seguintes:

- Transporte de sedimentos;
- Qualidade da água;
- Alteração da malha de cálculo durante uma simulação (rotura de barragem);
- Influência do vento.

Para o trabalho a realizar destaca-se a capacidade para simular o transporte de sedimentos. O programa computacional permite as opções de transporte de sedimentos em suspensão e/ou por arrastamento, incluindo um módulo para desabamentos (de avalanche) para quando a inclinação do terreno é superior ao ângulo de atrito interno do material.

Contudo, a inclusão do módulo de avalanche e/ou do módulo de transporte em suspensão originou em todas as simulações realizadas um erro de cálculo ao fim de um certo instante de tempo em células com dimensão pequena, baixas velocidades e altura de escoamento elevada. O erro é relativo à condição CFL, pois para essas células seria obrigatório diminuir o passo de tempo para não haver perda de informação e instabilização do escoamento. Por este motivo, e por não influenciar o estudo a efetuar, não se utilizou esses dois módulos nas simulações.

Para o cálculo do transporte sólido por arrastamento é utilizada a fórmula de *Meyer-Peter & Muller* (apresentada em 2.5.) pois pôde verificar-se que o uso desta fórmula nas simulações não origina erros de cálculo. A utilização deste módulo requer informações da dimensão das partículas, da porosidade e do ângulo de atrito do material.

A utilização do módulo de transporte de sedimentos é muito semelhante à do modelo hidrodinâmico. A interface de visualização de resultados e a apresentação dos mesmos é similar à do GUAD 2D. Permite, no entanto, a visualização mais resultados e em 3D. Ou seja, é possível uma melhor interpretação dos resultados obtidos sem necessidade de exportação dos mesmos para outras plataformas.

### 5.3. CALIBRAÇÃO DOS MODELOS

O objetivo da calibração do modelo é o de melhorar progressivamente os resultados obtidos durante as simulações através da alteração da malha utilizada, das condições fronteira utilizadas e da rugosidade, entre outros fatores.

A calibração do modelo é realizada através da análise de resultados das simulações, em condições semelhantes, realizadas através dos dois programas de cálculo utilizados. GUAD 2D e IBER.

Para se conseguir efetuar esta análise devem-se realizar, em primeira instância, simulações com operações simples, de modo a isolar fenómenos que possam ser erróneos e descobrir a causa desses problemas.

A comparação de resultados obtidos nos dois programas de cálculo pode ser efetuada em toda a extensão do modelo físico simulado numericamente, através da obtenção de perfis de velocidade, níveis e cotas da superfície livre, de mapas de velocidade e de hidrogramas em determinadas secções do escoamento. No entanto, a comparação quantitativa destes resultados com os obtidos em modelo reduzido será efetuada numa única secção transversal do escoamento, localizada entre as duas obras de restituição (Figura 24), correspondente ao perfil transversal onde, no modelo reduzido, foi determinado o módulo da velocidade para diversos valores da altura de água ao longo da secção.

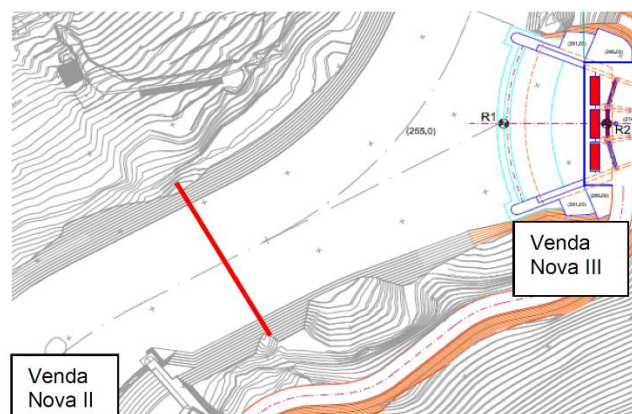


Figura 24 – Perfil (a vermelho) onde foram medidas as velocidades no modelo reduzido.

Na realidade, a melhor opção para comparação dos resultados dos dois modelos é a obtenção de perfis de velocidades para a mesma secção, obtendo-se as componentes transversais e longitudinais da velocidade em relação ao eixo do perfil. A definição dos sentidos positivo e negativo da velocidade nos perfis é feita tendo em conta um referencial local em cada perfil, com o sentido positivo do escoamento transversal ao perfil a coincidir com o do escoamento natural do rio.

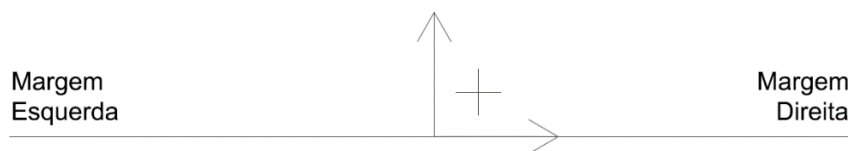


Figura 25 – Perfil transversal tipo com referencial local acoplado

No caso em estudo, foi possível fazer uma comparação visual do mapa de velocidades obtido no programa de visualização de resultados com informação contida no relatório dos ensaios em modelo reduzido e com fotografias e vídeos, e obtidos no laboratório de hidráulica da Artelia/Sogreah em Grenoble durante a realização dos ensaios em modelo reduzido.

### 5.3.1. ALTERAÇÕES DE DEFINIÇÃO EFETUADAS AO MODELO

Durante o processo de calibração do modelo, foi necessário introduzir alguns ajustes com o objetivo de melhorar ou até, em alguns casos, eliminar erros que foram surgindo ao longo do processo. Foi sempre garantido que as alterações efetuadas não produzem resultados que se considerem pouco adequados aos fins em causa.

Considerando o nível máximo que a água poderá atingir, o  $NMC=(270.86)$ , e tendo em conta a possível existência de escoamentos gradualmente variados, o nível máximo da água na albufeira nunca será superior à cota (272.00). Assumindo uma folga de 2 metros por questões de segurança no modelo, não se tornou necessário introduzir definição topográfica acima dessa cota, pois, como esse nível não é atingido as células acima desse valor não serão alvo de resolução das equações. O modelo ficou limitado superiormente à cota (274.00).

Com este procedimento poupa-se memória no computador para resolução de outras tarefas e tempo de cálculo, precioso para cálculos demorados.

Saliente-se que os programas a utilizar neste trabalho, por predefinição, funcionam de modo a que as células de um ficheiro que não possuam dados sejam descritas por -9999 num ficheiro RASTER/ASCII,

o que, num ficheiro de texto, corresponde a muita informação. Para ficheiros de tamanho reduzido, este pormenor não levanta problemas, mas para ficheiros com um número de linhas e colunas de ordem igual ou superior a  $10^3$  o processamento torna-se moroso e o trabalho nesses ficheiros ocupa muita memória num processador.

Outra alteração efetuada advém de um erro no modelo detetado na primeira simulação de bombagem ao Nmen. Na tomada de água em bombagem de Venda Nova III ocorre um fenómeno de descolamento do escoamento do muro ala de jusante e recirculação do lado esquerdo do mesmo pois a direção do escoamento (ortogonal ao limite) não é representada corretamente pela condição fronteira inserida.

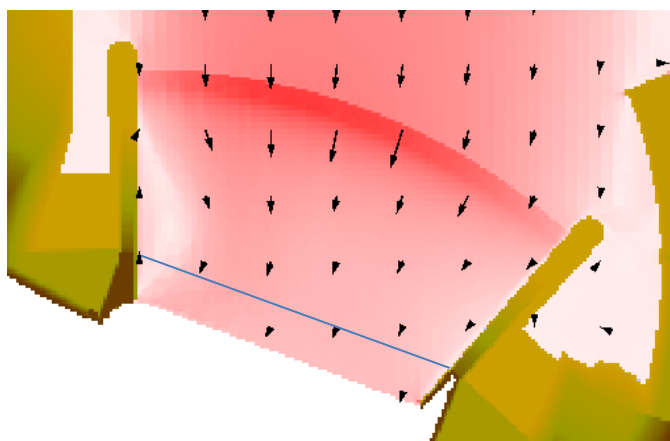


Figura 26 – Linha de corte do modelo na restituição de Venda Nova III

Decidiu-se eliminar, no possível, a informação relativa à estrutura de restituição em turbinamento de Venda Nova III, com o objetivo de diminuir a intensidade deste fenómeno de tal modo que não interfira no escoamento para zonas exteriores à estrutura.

A última modificação consistiu na remodelação da secção fronteira de jusante. Em condições de bombagem, não foi possível inserir uma condição fronteira de entrada do tipo  $h(t)$ , pois não se garantiu a estabilização do modelo em termos de entrada e saída de caudal ao longo da referida secção, bem como da direção do escoamento.

Este problema ocorre nos dois modelos e é mais grave no IBER, pois este não permite o uso de curvas de vazão para cenários de bombagem. A origem desse problema está na secção fronteira do modelo: a mesma deve ter a orientação Norte-Sul ou Este-Oeste de modo a que as fronteiras das células adjacentes a essa secção possuam a mesma direção. Verifica-se que fronteiras com orientações diferentes às indicadas dão origem a orientações do escoamento diferentes de célula para célula, o que origina o problema referido.

A opção para contornar este problema consistiu, em primeira análise, na consideração de um corte horizontal do modelo pelo estrangulamento do canal 20 metros a montante da secção de jusante do modelo, de modo a que não haja interferência da batimetria na orientação do escoamento. Esta medida permitiu uma estabilização temporária do modelo, mas com o aumento do tempo de simulação a direção do escoamento deixa de ser ortogonal à referida secção de jusante, como é visível na Figura 27.

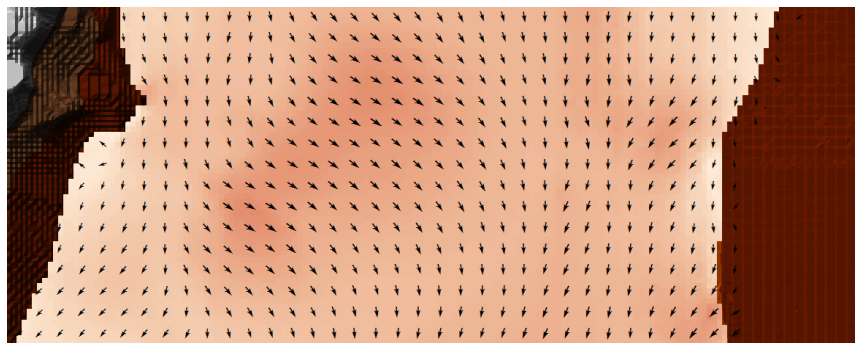


Figura 27 – Problema na direção do escoamento na secção fronteira de jusante para a condição  $h(t)$  no cenário R0\_Nmen\_BIII160\_BII0.

A alternativa que originou melhores resultados consistiu no prolongamento da última secção para jusante (criando uma extensão fictícia da topografia ao modelo físico) de modo a que houvesse uma mesma secção transversal ao longo de um comprimento mínimo que permita a estabilização da orientação do escoamento. O comprimento mínimo para que ocorresse estabilização do comportamento do modelo é de cerca de 15 metros. O modelo final ficou, assim, com um prolongamento fictício de 16 metros.

Esta alteração ao modelo não requereu alterações aos níveis definidos para as curvas de vazão, pois a perda de energia ao longo do comprimento da alteração do canal considerado é negligenciável.

Apura-se que, para níveis de água elevados com baixos caudais (apêndices B4 e B5 ao NPA), como são os casos em que Venda Nova apenas tem um grupo a funcionar em modo de bombagem, ocorre ainda uma instabilização das velocidades de entrada na secção de jusante do modelo. A solução para estes casos consiste na alteração da condição fronteira após a estabilização da cota da superfície livre e dos caudais no modelo, de uma condição  $h(t)$  para uma  $Q(t)=\text{constante}$ , que permite a estabilização do modelo de modo idêntico à obtida com o GUAD 2D.

Mesmo após as alterações referidas, o modelo numérico final representa ainda de modo irreal o escoamento perto das zonas fronteira para alguns cenários, mas essas irregularidades não se fazem notar nos pontos de interesse da zona de estudo. São exemplos desses problemas as recirculações do escoamento dentro da estrutura de restituição de Venda Nova III para situações de bombagem, ainda que com menor dimensão que aquela apresentada na Figura 26.

O modelo físico final a empregar nas simulações hidrodinâmicas, igual para os dois programas utilizados, é apresentado na Figura 28:

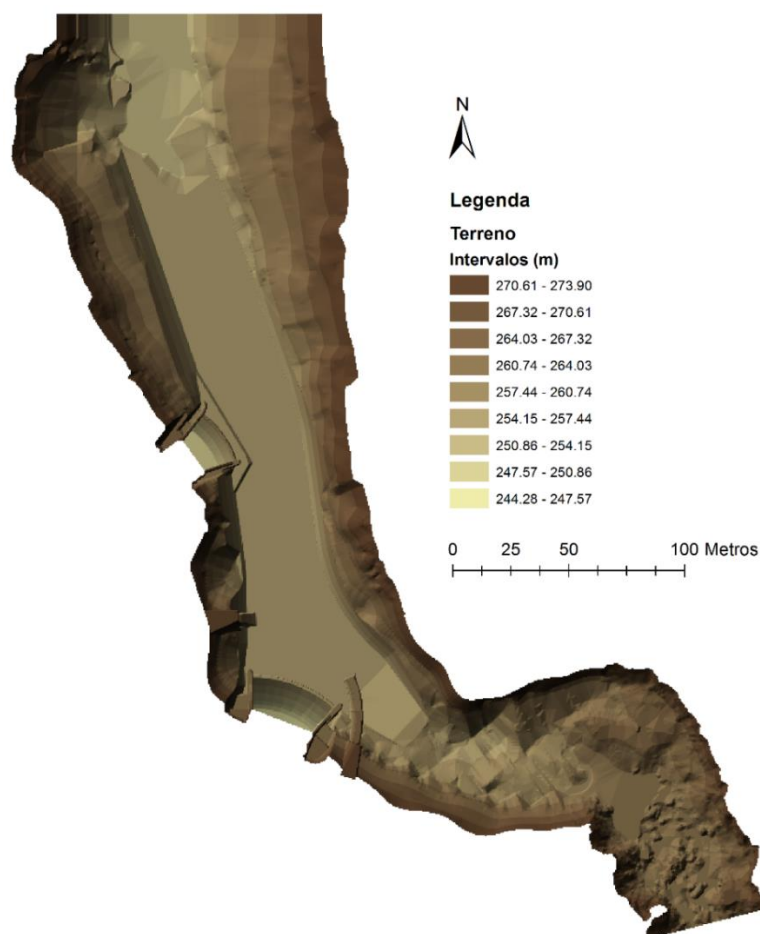


Figura 28 – Modelo final após as 3 alterações ao modelo inicial

Quanto à utilização do modelo para transporte de sedimentos, a diferença em relação ao modelo físico anterior consiste na alteração das cotas do fundo do canal, correspondente à presença de sedimentos e decorrentes da erosão e deposição dos mesmos.

As simulações a efetuar devem partir de uma situação de estabilização dos fundos. De modo a obter tal configuração é necessário fazer uma alimentação de sedimentos juntamente com caudal pela fronteira de montante do modelo e deixar essa simulação correr até haver estabilização dos fundos em toda a extensão do modelo.

Tal cenário acarreta problemas resultantes do elevado tempo de cálculo necessário: o fator principal é o tempo limitado para efetuar este estudo mas a possibilidade de ocorrência de erros no programa ou no computador e de falta de memória não permitem confiar cegamente em tal situação. Para tal, decidiu-se modelar o fundo do canal com a disposição de sedimentos depositados obtida no ensaio análogo em modelo reduzido e efetuar as simulações para um modelo com topografia ligeiramente diferente daquela utilizada para as simulações hidrodinâmicas.

Analisando a disposição final obtida nos ensaios em modelo reduzido dos sedimentos depositados, tentou-se reproduzir a mesma no IBER (Figura 30). A deposição de sedimentos no canal observa-se, na Figura 29, sobretudo do lado esquerdo do canal, atingindo em algumas zonas a cota de (257.00), que corresponde à cota da crista do lábio da estrutura de restituição de Venda Nova III.



Figura 29 – Configuração dos sedimentos no fundo do canal junto à restituição de VN III (esq.) e VN II (dir.) (ARTELIA, 2013b)

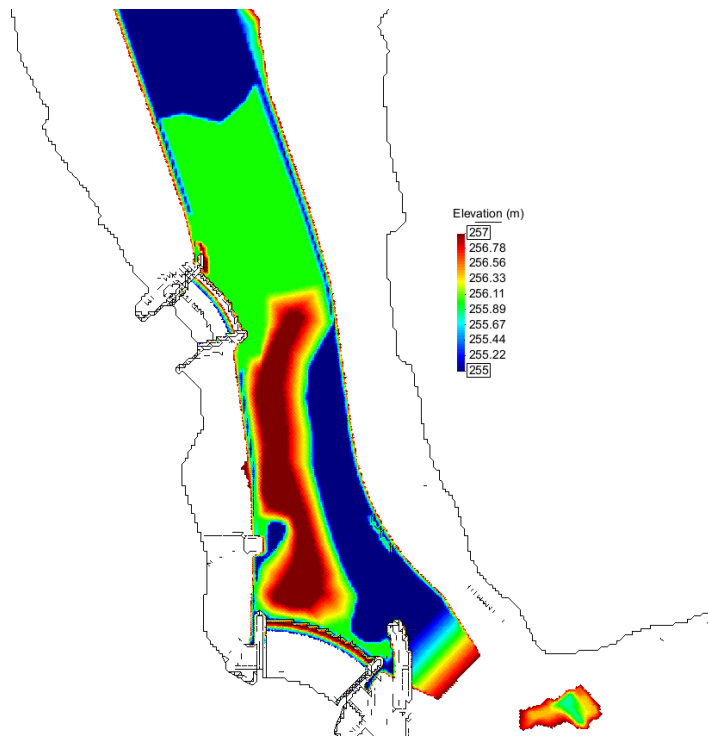


Figura 30 – Configuração do canal no IBER após edição das cotas do fundo

Para as simulações realizadas com o IBER tornou-se necessário definir o *Rock layer* ou *bedrock*, ou seja, a cota a partir da qual não é possível haver erosão. O mais complicado foi a introdução da informação do *Rock layer* (Figura 31) no programa pois, para a configuração inicial das simulações, o programa obriga a definir as diferentes condições na malha manualmente, sendo que:

- Nas margens do canal e nas estruturas não é permitida a erosão (verde e amarelo);
- No fundo do canal, é permitida a erosão até à cota do talvegue (255.00) (azul);
- Na secção adjacente à restituição de VN II a cota do terreno é (256.00) (magenta).



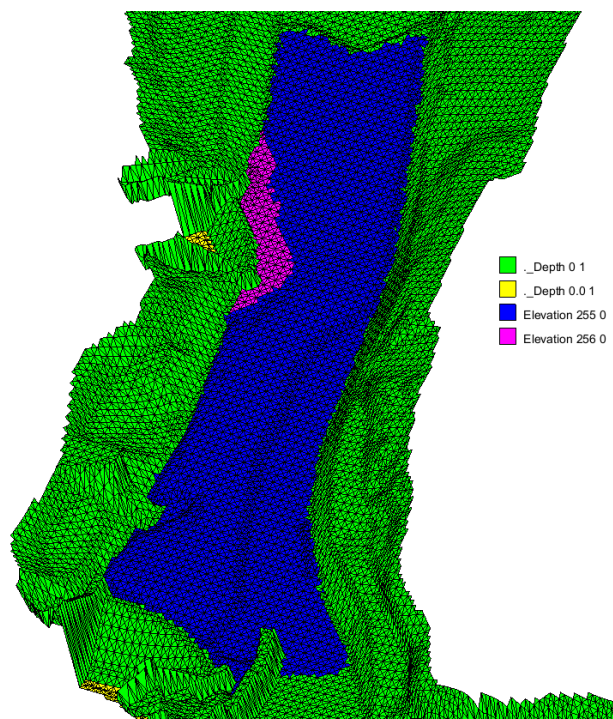


Figura 31 – Diferentes condições para o *Rock layer*

### 5.3.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À DIMENSÃO DAS CÉLULAS DE CÁLCULO

O objetivo desta análise prende-se no facto de ser possível definir a precisão do modelo em termos da dimensão das células e da triangulação da malha.

#### 5.3.2.1. Modelo GUAD 2D

Seguindo a linha de pensamento descrita em 5.1., quanto maior for a dimensão das células, menor será a precisão do modelo mas o tempo de cálculo diminui, e reciprocamente.

A primeira limitação para o cálculo encontrada prende-se no facto de o uso de uma malha com células de dimensão  $0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$  originar um modelo numérico com cerca de 1.45 milhões de células. A licença disponível do programa GUAD 2D limita o uso a malhas com menos de 1 milhão de elementos, pelo que se tornou necessário utilizar uma malha com células de maior dimensão.

Por este motivo, no mínimo, a dimensão máxima da célula teria de ter 0.5 metros em vez de 0.25 metros. Para as diferentes combinações possíveis correspondem os números de triângulos da malha referidos no Quadro 6:

Quadro 6 – Número de células no GUAD 2D para o modelo inicial

Área das células da malha (m <sup>2</sup> )	Área máxima das células trianguladas (m <sup>2</sup> )	Número de triângulos da malha
0.25x0.25	0.25x0.25	1 453 738
(Erro máximo de cota de 0.2 metros)	0.5x0.5(x)	514 235
	1.0x1.0	233 161
0.5x0.5	0.5x0.5(x)	367 390
	1.0x1.0	147 327

Atentos esses valores, pôs-se de parte o uso de dimensões de células com área superior a 0.5x0.5 m<sup>2</sup>, pois o tempo de cálculo para malhas com esta dimensão já é inferior a 1 dia, o que se verificou ser já suficiente para a realização de todas as simulações pretendidas, e uso de uma dimensão máxima da célula de 1.0x1.0 m<sup>2</sup> origina uma grande perda de informação da topografia pelo que essa opção foi posta de parte.

As duas alternativas restantes (indicadas com uma cruz no Quadro 5) foram alvo de simulações para 2 cenários de bombagem e de turbinamento de modo a verificar se as mesmas apresentavam resultados semelhantes, pois o uso da malha com maior precisão resulta num tempo de cálculo excessivo e daí surge a necessidade de estudos de sensibilidade.

#### 5.3.2.2. Modelo IBER

Para este programa computacional a análise de sensibilidade verificou-se supérflua pois, das duas opções de triangulação da malha, aquela que permitia efetuar a mesma de modo semelhante à do GUAD 2D, designada malha não estruturada, origina células com dimensões muito pequenas que provocam erros durante o processo de cálculo. A opção restante, designada malha estruturada, consiste na atribuição de um número inteiro de células a cada linha da TIN criada pelo programa.

Ou seja, as arestas de 1 metro de um triângulo associam-se 2 superfícies com um comprimento de lado de 0.5 metros cada; as arestas de 2 metros são divididas por 4 superfícies e assim sucessivamente, para obter células trianguladas com dimensão do lado de 0.5 metros. Esta opção apresenta um problema: a divisão das linhas por 2 ou 3 células significa passar de cerca de 220 000 células para cerca de 780 000 células, o que representa um aumento do tempo de cálculo em cerca de 3 vezes, pelo que apenas foi efetuada uma comparação de resultados entre estes dois modelos para validar o bom funcionamento do modelo com menor número de células.

Como os métodos de criação da malha são diferentes nos 2 programas, o número de células e até mesmo a malha em si apresentam diferenças, os dois modelos foram comparados entre si, no subcapítulo seguinte, e com os resultados obtidos nos ensaios em modelo reduzido no capítulo seguinte.



### 5.3.2.3. Cenários de Comparação de resultados

De modo a analisar dois modelos com tamanhos de células diferentes, foram simulados vários cenários. Apresenta-se como exemplo o cenário **R0\_Nmen\_TII200\_TII50**. Para este cenário, as direções e grandezas das variáveis de estudo (caudal, velocidade, altura de água) haviam sido estabilizadas aos 15000 segundos de simulação. Para este cenário, compararam-se as malhas de  $0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$  e  $0.50 \times 0.50 \text{ m}^2$ .

O número de células de cada simulação é o indicado no Quadro 7:

Quadro 7 – Número de células

Dimensão mínima do lado das células ( $\text{m}^2$ )	GUAD 2D	IBER
0.25	514 235	779264
0.5	367 390	222636

O primeiro passo de comparação é a análise visual do mapa de velocidades, isto é, se a direção do escoamento e a ocorrência de recirculações se assemelham nos dois casos.

Na Figura 32 são comparados os campos de velocidades através dos dois modelos, GUAD 2D e IBER, para malhas trianguladas de dimensão mínima do lado de 0.5 metros e 0.25 metros.

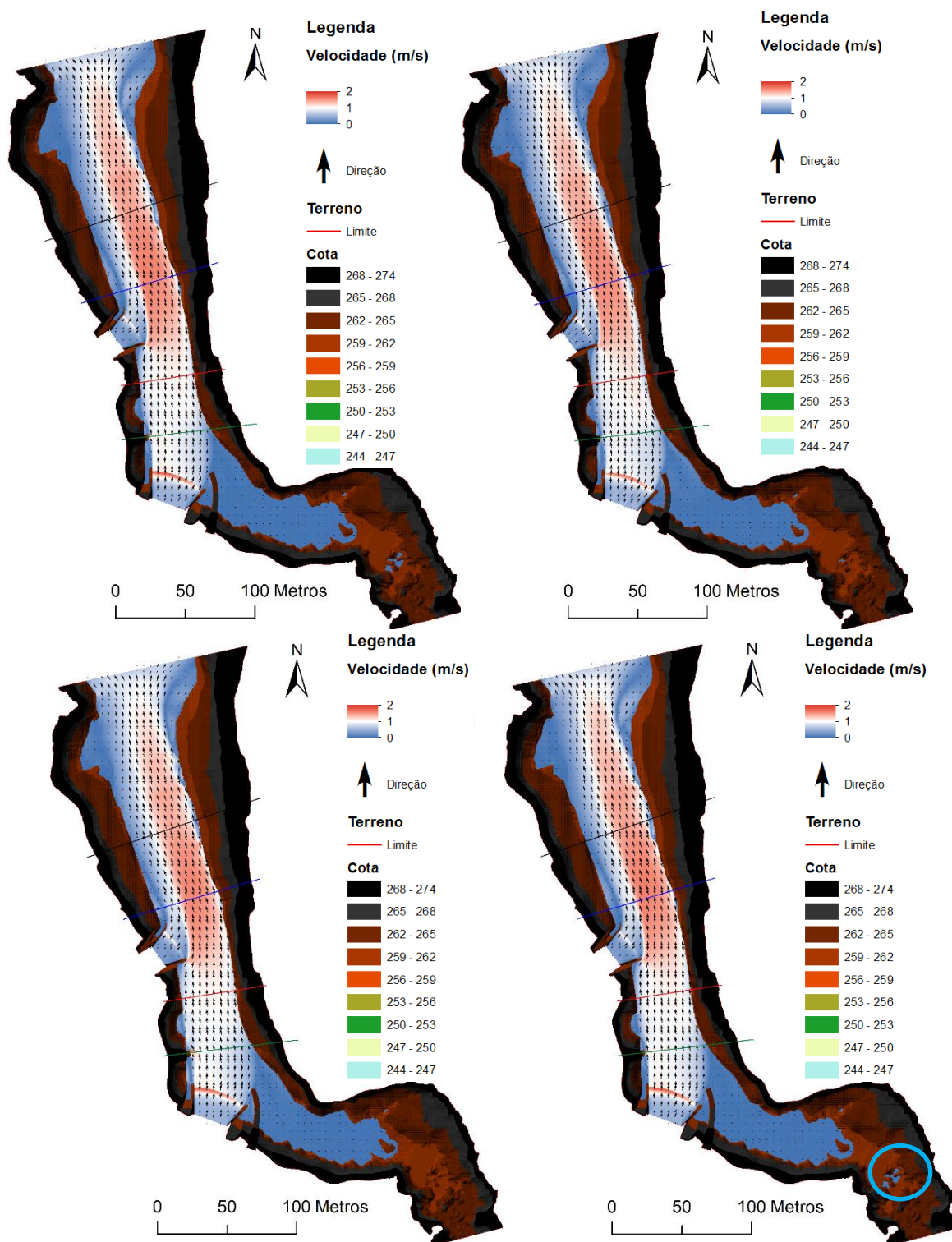


Figura 32 – Mapa de velocidades para a malha de 0.50 m (esq.) e 0.25 m (dir.), para o IBER (cima) e GUAD 2D (baixo)

Visualmente não são detetáveis diferenças com significado. Os dois fenómenos de recirculação de maior relevância e que ocorrem a jusante da restituição de Venda Nova II, na margem esquerda, são ambos representados de modo semelhante nos dois modelos.

É visível na Figura 32 a linha de divisão do escoamento proveniente de Venda Nova III e do caudal turbinado em Venda Nova II, com o primeiro a possuir maior velocidade que o segundo. Este pormenor é corroborado com os resultados nos ensaios em modelo reduzido para o mesmo cenário (Figura 33):

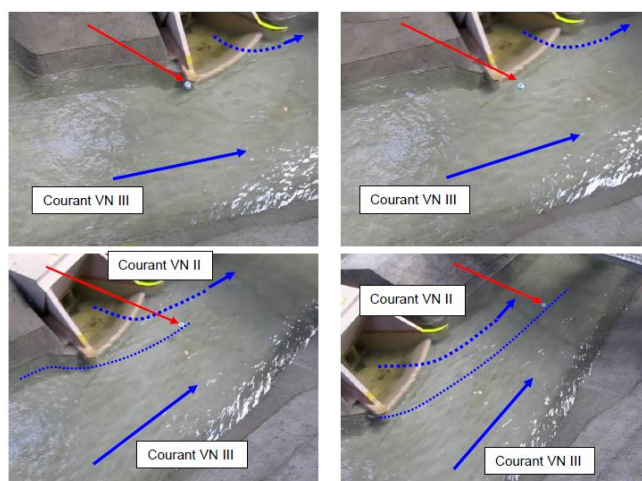


Figura 33 – Condições de escoamento na restituição de Venda Nova II para o cenário R0\_Nmen\_TII200\_TII50 (ARTELIA, 2013a)

Salienta-se a existência de uma concentração local de escoamento assinalado com um círculo azul na Figura 32 (figura da direita, em baixo) que corresponde a uma depressão no terreno onde, no início da operação de turbinamento, se desenvolve um regime gradualmente em que a água fica retida quando o nível baixa; a resultante da velocidade é nula, mas como existe água nesse ponto, essa singularidade fica assinalada no ficheiro de dados. Justificam-se, assim, possíveis casos semelhantes que possam ocorrer para outras simulações ao Nmen e ao NmE.

Foram comparados perfis transversais das componentes longitudinais e transversal da velocidade com base nos dois modelos computacionais, com o intuito de verificar se estes apresentam resultados semelhantes.

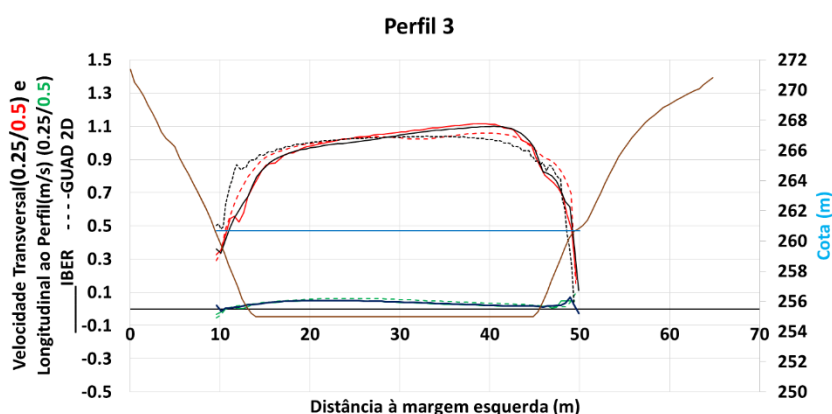


Figura 34 – Comparação das componentes transversal e longitudinal da velocidade na secção transversal de referência (ver Figura 24), obtidas pelos dois modelos utilizados

A componente longitudinal da velocidade do escoamento é representada pela velocidade transversal ao perfil e a componente transversal da velocidade é representada pela velocidade longitudinal ao perfil. Isto, porque na zona a estudar os escoamentos são complexos, pelo que é difícil analisar os resultados com as direções naturais do escoamento.

Na Figura 34 é visível que a velocidade aumenta da margem esquerda para a margem direita, com três das simulações a apresentarem resultados quase idênticos. O resultado mais dissonante dos restantes, corresponde ao obtido com célula de cálculo de  $0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$  com o modelo GUAD 2D (a simulação mais demorada), apresenta um aumento da velocidade da esquerda para a direita menor que o verificado nas outras simulações, sendo a velocidade mais uniforme ao longo de toda a largura do canal.

São apresentados também (Figura 35-malha  $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$  e Figura 36-malha  $0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$ ) os resultados para um perfil 10 metros a jusante da restituição de Venda Nova III de modo a que se consigam representar fenómenos de recirculação e apenas para o GUAD 2D, pois no IBER não se observam diferenças entre os resultados das duas simulações.

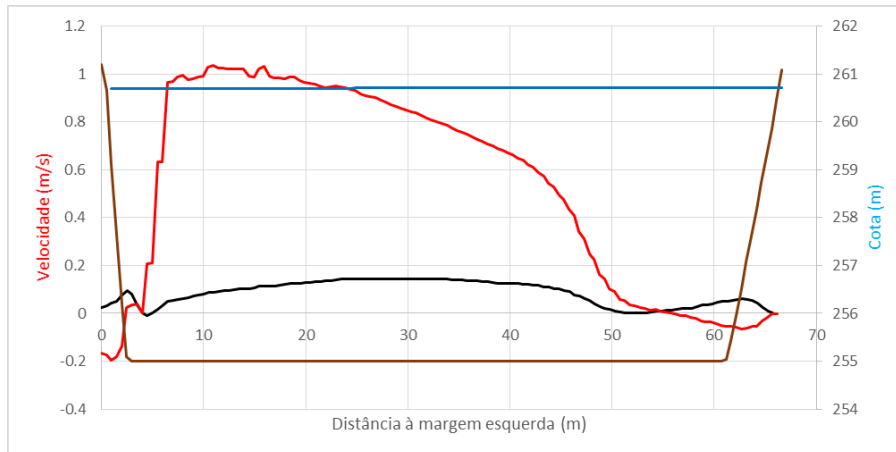


Figura 35 – Perfil de velocidades obtido no GUAD 2D para a malha de  $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$

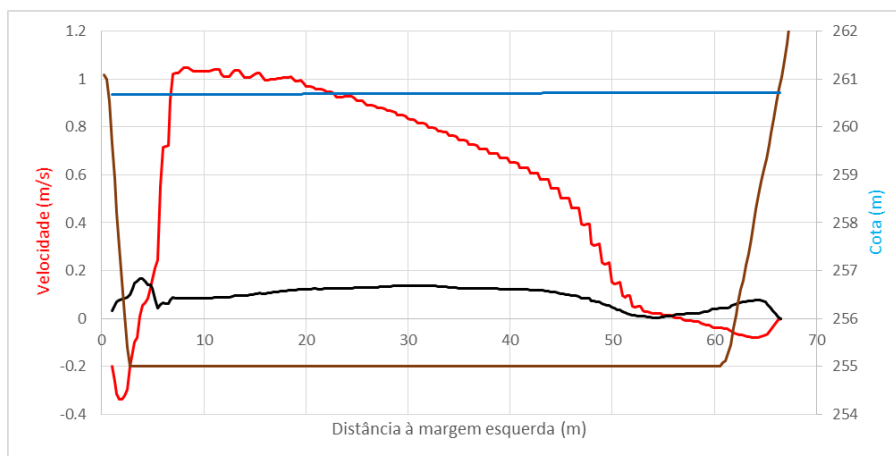


Figura 36 – Perfil de velocidades obtido no GUAD 2D para a malha de  $0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$

Da análise dessas figuras (34 e 35) podem retirar-se as seguintes conclusões:

-Pode-se visualizar que o perfil de velocidades transversais (vermelho) e longitudinais (preto) na secção de escoamento é semelhante, concentrando-se o escoamento do lado esquerdo do canal.

-Verifica-se a existência de dois fenómenos de recirculação, um com velocidades inferiores, na margem direita, e outro com maiores velocidades junto à margem esquerda, isto porque existem velocidades transversais ao perfil de resultante negativa. Este fenómeno deve-se ao facto de haver um volume de água do lado esquerdo do muro ala de jusante da restituição de Venda Nova III que não contribui para o escoamento útil. A não existência de caudal no rio Rabagão proporciona uma situação semelhante do lado direito.

Os fenômenos referidos encontram-se representados nos dois modelos, mas é difícil haver uma correspondência total, pois o tamanho das células influencia a posição do centro de uma recirculação que, quando comparando os 2 modelos, pode estar afastado alguns centímetros.

A boa representação destes fenômenos ocorre para outros perfis testados e, apesar de haver alguma perda de informação, a utilização de um modelo com células de tamanho 0.50 metros em relação ao uso de um tamanho de 0.25 metros tem duas vantagens importantes:

- A simulação de 20000 segundos para o NmE e para o NmE no modelo de 0.25 metros demora cerca de 32 horas no computador onde se encontra a licença de uso do GUAD GUI. As mesmas simulações para o modelo de 0.5 metros demoram entre 20 e 21 horas.
- O tratamento dos ficheiros de resultados para o modelo de 0.25 metros é um processo moroso e onde há problemas de memória nas máquinas: Com 1736 colunas e 1310 linhas, o tratamento de informação através de programas de cálculo, como MATLAB ou EXCEL, não permite a execução de mais tarefas em simultâneo. O tempo de cálculo é um fator fulcral, pelo que a possibilidade de cálculo e tratamento de resultados num *software* GIS em simultâneo é uma mais-valia importante;

Analizando estes fatores, decidiu-se utilizar no estudo um modelo com células com dimensão mínima de 0.50 metros, que apresenta bons resultados e onde o tempo de cálculo e de processamento de resultados é inferior a metade do tempo necessário para um modelo com células com metade do tamanho.

Para o GUAD 2D, o modelo final fica com 352 146 células e o IBER com 212 940.

Como segundo exemplo, é apresentado o cenário R0\_NmE\_TIII200\_TII0 pois, como corresponde a uma altura de escoamento menor para um mesmo caudal, as velocidades são superiores. Apresenta-se aqui apenas a comparação do perfil de velocidades entre o modelo reduzido e os dois modelos numéricos pois não se detetam, tal como no cenário anterior, diferenças visuais nos campos de velocidades.

As condições inseridas no modelo e as impostas pelo operador para a simulação são as seguintes:

- Base topográfica com células de área  $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ ;
- Máximo erro de cota de 0.1 m (GUAD 2D);
- Máximo comprimento do lado do triângulo de 0.5 m (GUAD 2D);
- Importação direta do ficheiro ASCII ( $0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$ ) para uma TIN e consecutivamente para a malha no IBER, sendo cada superfície da TIN dividida em 2 triângulos;
- Condição fronteira de jusante  $h(t) = \text{constante} = 259.00$  metros;
- Manobra instantânea e simultânea dos grupos de ambos os aproveitamentos;
- Nível inicial correspondente ao NmE;
- Instante final de simulação após a diferença de velocidades em todas as células ser inferior a 0.01 m/s, e analogamente para o nível de água.

Comparando os perfis de velocidade obtidos em modelo reduzido com os análogos em ambos os modelos numéricos os resultados são os apresentados nas duas figuras seguintes:

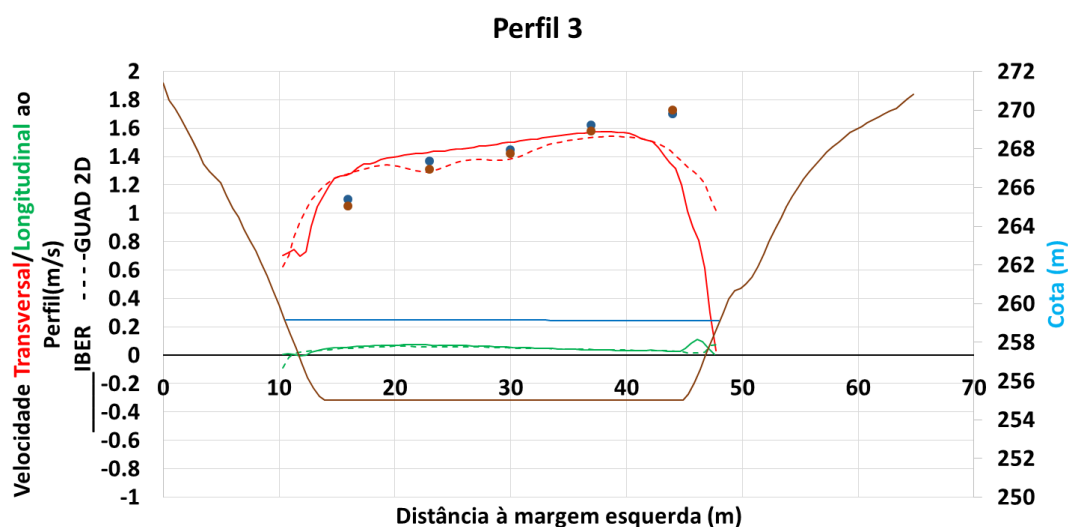
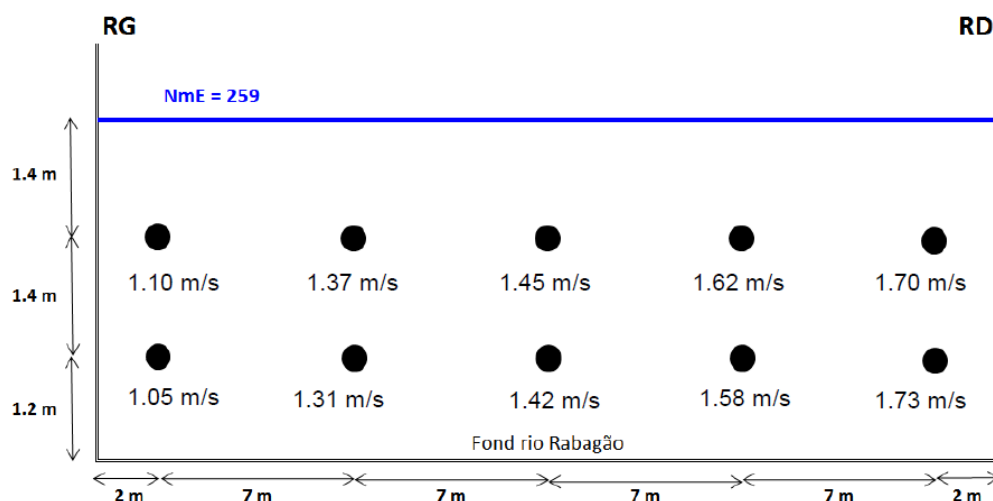


Figura 37 – Perfil de velocidades obtido no GUAD 2D e no IBER

Os pontos azuis e castanhos presentes na Figura 37 correspondem aos valores apresentados na Figura 38.


Figura 38 – Valores de velocidades transversais obtidos em modelo reduzido na **seção plana** do canal

Verifica-se que na seção em análise a velocidade transversal ao perfil aumenta da margem esquerda para a margem direita e esta configuração é explicada por dois motivos:

- A estrutura de restituição encontra-se na margem esquerda, direcionando o escoamento para a margem direita;
- A presença da estrutura de restituição de Venda Nova II, a jusante do perfil e na margem esquerda, funciona como barreira ao escoamento, forçando a diminuição da velocidade daquele lado.

A velocidade apresenta um valor máximo de 1.57 m/s no IBER e de 1.55 m/s no GUAD 2D obtido na mesma abscissa do gráfico, perto do limite do lado direito da zona plana do canal. No modelo reduzido a velocidade máxima é um pouco superior, de 1.70 a 1.73 m/s. No modelo reduzido, os valores máximos das velocidades são um pouco superiores àqueles obtidos nos modelos numéricos e os inferiores são menores. A maior diferença é de 0.2 m/s.

A configuração do gráfico é semelhante, no entanto, para o GUAD 2D existem três patamares que ocorrem devido à configuração do lábio da estrutura de restituição de Venda Nova III.

Como essa configuração é curvilínea, o centro de uma célula pode representar o patamar superior à cota (257.00) enquanto uma célula adjacente possui a cota de um ponto da superfície do canal à cota (255.00). Para níveis de água muito baixos, esta perda de informação é responsável pela ocorrência de escoamentos próximos do crítico (e mesmo com um número de Froude superior a 1) e pela existência de percursos preferenciais para o caudal. Esta situação explica o perfil de velocidades 50 metros a jusante (Figura 37 a tracejado), situação que desaparece após a restituição de Venda Nova II.

Esta limitação do modelo, visível na Figura 39, apenas ocorre no GUAD 2D para operações de turbinamento em Venda Nova III e para níveis muito baixos (Apêndices A1 e A2 para o NmE e Nmen). A utilização de uma malha com células de menor dimensão apenas atenua este problema, formando-se mais patamares com menor diferença entre si.

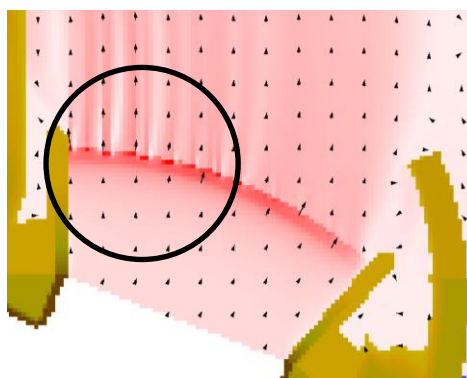


Figura 39 – Linhas de escoamento preferenciais em operações de turbinamento em Venda Nova III para o NmE.

O problema acontece porque a malha quadrada não representa arestas que não possuam orientação vertical ou horizontal, havendo uma perda de informação que apenas seria desprezável para dimensões de célula muito pequenas. Para a malha de dimensão  $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$  do GUAD 2D, o encontro de jusante da enscadeira provisória fica representada de modo a que, junto às zonas marcadas com um círculo na Figura 40, seja criado um corredor preferencial para o escoamento, que origina aumentos da velocidade locais. Nessa figura, a linha reta representa a aresta superior do encontro tal como existe no local.

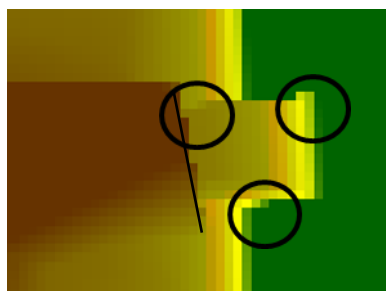


Figura 40 – Má representação do espaço por parte de uma malha quadrada.

Para este cenário pode-se concluir que ambos os modelos utilizados são validados pelos resultados obtidos em modelo reduzido, destacando-se que este cenário é o que apresenta maiores incongruências devido ao problema explicitado.

A comparação do cenário ao longo de todo o canal, com a configuração final do modelo, para este e para os restantes níveis e cenários de calibração do modelo, apresenta-se no capítulo seguinte, de resultados.





## 6

**ANÁLISE DE RESULTADOS**

Após a fase de projeto de Venda Nova III foi ponderada a possibilidade de funcionamento em simultâneo de operações de turbinamento e bombagem. Para se simular este tipo de cenários através de modelos numéricos foi necessário calibrar os modelos numéricos utilizados com os resultados dos ensaios em modelo reduzido para operações de turbinamento ou bombagem. O bom funcionamento de ambos os modelos permitiu ter confiança nos resultados obtidos para simulações de turbinamento e bombagem em simultâneo.

Este capítulo, para além da análise dos resultados dos cenários que permitem a validação dos modelos, foca-se na análise dos resultados das simulações de operações de turbinamento e bombagem simultâneas, que respondem aos objetivos do trabalho. O presente capítulo contém uma apresentação dos resultados obtidos para as configurações finais dos modelos utilizados.

A ordem de apresentação de resultados é a que foi definida nos quadros 2 e 4 em 4.2. Cenários de simulação. Os cenários de turbinamento e bombagem são os de calibração e validação dos modelos e por isso são os primeiros a ser analisados. Os cenários de operações de turbinamento e bombagem em simultâneo são apresentados no seguimento.

Os resultados são divididos por operação: para um modo de funcionamento dos dois aproveitamentos em bombagem ou turbinamento é realizada a análise para 3 conjuntos de resultados, um para cada nível simulado, enquanto para cenários de funcionamento turbinamento e bombagem simultâneas existem apenas dois resultados, para o  $NPA=(270.36)$  e para o  $Nmen=(260.56)$ . Sempre que foram realizadas simulações de transporte de sedimentos com o IBER, os resultados correspondentes aos cenários são apresentados no verso da figura do Apêndice do cenário respetivo.

As figuras principais dos resultados encontram-se no apêndice pela ordem que são apresentados. O mapa de velocidades apresentado no apêndice para as operações de turbinamento e bombagem simples e para o primeiro conjunto de operações de turbinamento/bombagem em simultâneo (bombagem em Venda Nova III e turbinamento em Venda Nova II) corresponde ao obtido no IBER. Para os restantes cenários é apresentado o campo de velocidades obtido no GUAD 2D.

Este pormenor é pouco relevante porque, visualmente, os resultados são semelhantes entre os modelos. Quando tal não acontece, são mostrados ambos os resultados. Os mapas são constituídos por um esquema de cores representativo do módulo da velocidade e por vetores representando o campo de velocidades, ou seja, com o valor da velocidade e a direção do escoamento. O vermelho corresponde às velocidades máximas e o azul corresponde às velocidades mínimas. As escalas são iguais entre simulações para o mesmo nível da superfície livre, mas diferem entre níveis para facilitar a interpretação

de resultados. No verso das figuras, quando as simulações incluem transporte de sedimentos, o vermelho corresponde à deposição de sedimentos e o azul corresponde à erosão no leito do canal.

Os resultados são observados em 4 perfis (Figura 41), ordenados de jusante para montante. Dois dos perfis situam-se entre as duas obras de restituição e os restantes localizam-se a jusante da restituição de Venda Nova II.

O perfil 1 tem interesse para o estudo principalmente quando há entrada de caudal pela fronteira de jusante do modelo, podendo-se verificar se quaisquer perturbações ou diferenças que ocorram entre os modelos já se dissiparam e não influenciam os resultados para montante.

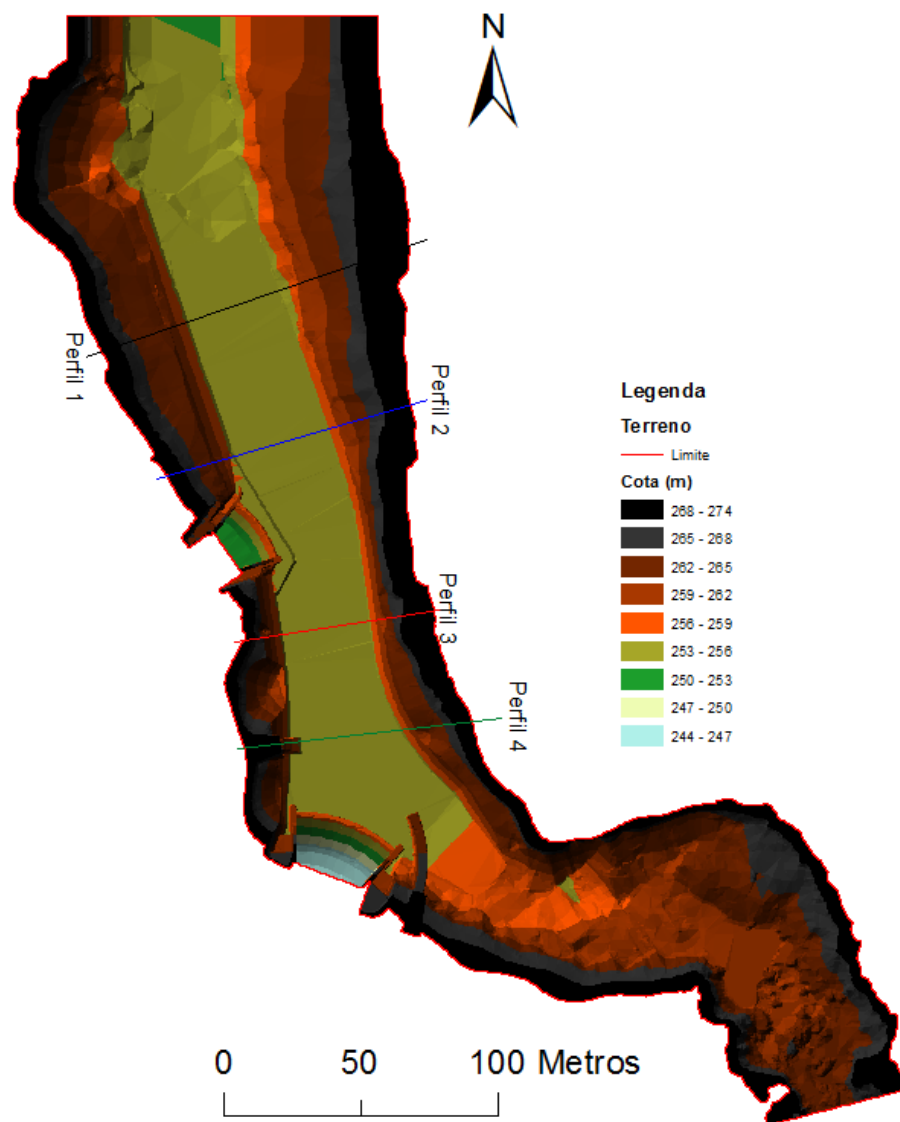


Figura 41 – Localização dos perfis onde são analisadas as velocidades

A análise dos resultados é apresentada no sentido do escoamento, ou seja, do perfil 1 para o 4 para operações de bombagem e reciprocamente para operações de turbinamento.

## 6.1. OPERAÇÕES DE TURBINAMENTO

### 6.1.1. TURBINAMENTO EM VENDA NOVA III E TURBINAMENTO EM VENDA NOVA II

As operações de turbinamento dos dois grupos de VN III (200 m<sup>3</sup>/s) e de dois grupos de VN II (50 m<sup>3</sup>/s) para os três níveis de operações característicos, NPA=(270.36), Nmen=(260.56) e NmE=(259.00), são apresentados no Apêndice A1. Estas operações serão as mais usuais com a totalidade dos grupos dos dois aproveitamentos, principalmente as referentes aos dois níveis superiores. O nível inferior, conforme o nome indica apenas será atingido em situações excepcionais.

Pela análise dos resultados verifica-se, para os três níveis, um escoamento uniformizado em toda a largura do canal.

O perfil 4 situa-se perto da restituição de VN III, logo o escoamento é uniforme em toda a largura do canal. É visível o problema referido da divisão do escoamento no lábio da restituição de VN III no GUAD 2D para o NmE (terceira figura do apêndice A1), que se dissipa no espaço entre este perfil e o seguinte.

No perfil 3 a velocidade transversal ao perfil é apenas um pouco superior no lado direito do canal, pois, tal como já acontecia na calibração do modelo, a obra de restituição de VN III direciona ligeiramente o escoamento da margem esquerda para a direita e o muro ala de montante da restituição de VN II funciona como obstáculo ao escoamento, o que faz diminuir a velocidade do lado esquerdo.

No perfil 2 o escoamento proveniente da restituição de VN II faz diminuir a secção pela qual o escoamento proveniente de VN III se processa, provocando 2 patamares de velocidades, um do lado esquerdo, referente ao escoamento de VN II e outro do lado direito, referente ao escoamento de VN III. Nesse trecho ocorrem as maiores velocidades para este cenário. Com a diminuição do nível de água, as velocidades são superiores em toda a extensão do modelo, pois para um mesmo caudal a diminuição da secção de escoamento implica um aumento de velocidade.

Esta divisão do escoamento também foi detetada no modelo reduzido conforme se pode ver na Figura 42:

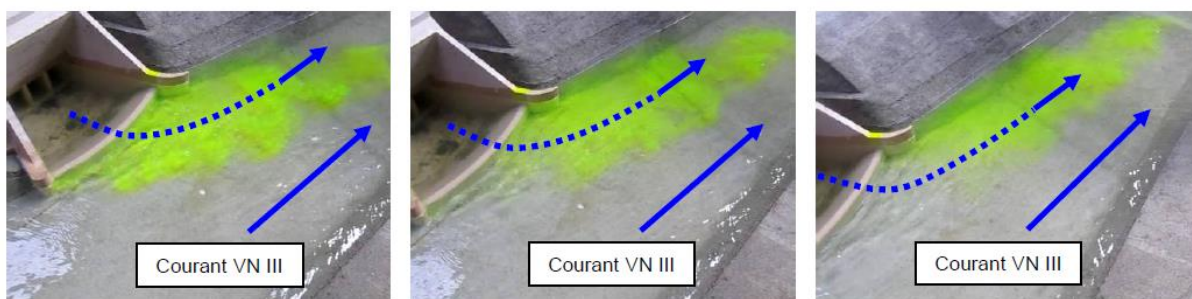


Figura 42 – Divisão do escoamento para o NmE obtido em modelo reduzido

Para o NmE as velocidades máximas atingem 2.28 m/s no GUAD 2D e 2.17 m/s no IBER, numa zona central do perfil.

No perfil 1 o escoamento é novamente bem distribuído, com os valores máximos da velocidade a situarem-se mais para a esquerda com o aumento do nível da água pois, como o escoamento de VN II “empurra” o escoamento de VN III para a margem direita, o aumento do nível da superfície livre permite que o escoamento se processe mais à direita.

Numa análise global, ambos os modelos testados apresentam resultados muito semelhantes e compatíveis com os resultados em modelo reduzido.

Relativamente ao transporte de sedimentos, este cenário foi simulado para o Nmen e para o NmE. Destaca-se, em primeiro lugar, que o campo de velocidades é ligeiramente diferente ao obtido nos modelos puramente hidrodinâmicos, porque a configuração do canal é ligeiramente diferente e como os fundos são móveis, o campo de velocidades é variável com o tempo.

Esta diferença acontece em todos os cenários. A figura seguinte serve de exemplo, comparando para o Nmen os dois campos de velocidades obtidos no IBER.

É visível que nas zonas onde há sedimentos depositados verificam-se velocidades superiores, pois a secção de escoamento é menor.

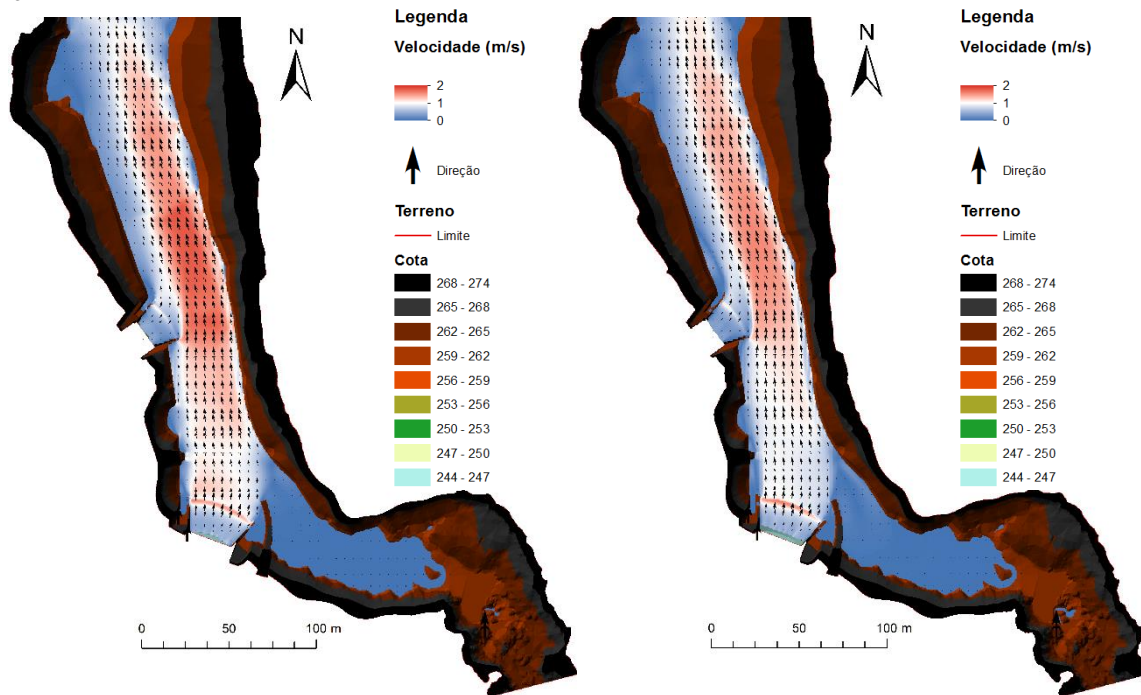


Figura 43 – Mapa de velocidades para simulação ao Nmen com sedimentos (esq., T=10h) e puramente hidrodinâmica (dir.)

Pela análise das figuras que representam a erosão com o tempo, conclui-se que o transporte de sedimentos ocorre na direção do escoamento e que existe uma remoção do material depositado em frente a ambas as restituições, mas com uma velocidade muito lenta. Para o NmE a remoção ocorre de forma mais rápida porque as velocidades são superiores, mas ainda assim muito lenta.

Tais conclusões foram alcançadas nos ensaios em modelo reduzido, corroborando o bom funcionamento do modelo utilizado para cenários de turbinamento.

#### 6.1.2. TURBINAMENTO EM VENDA NOVA III

O apêndice A2 refere-se ao funcionamento de dois grupos em turbinamento em VN III que totalizam 200 m<sup>3</sup>/s, respetivamente, para os três níveis de operação característicos.

Tal como nos casos anteriores, o escoamento distribui-se de modo uniforme em quase toda a largura do canal.

No perfil 4 a distribuição da velocidade é perfeitamente uniforme salvo para o NmE, onde ocorre uma perturbação no escoamento, podendo-se atribuir à proximidade do lábio da estrutura de restituição de VN III, com reduzida submersão, que o modelo tem dificuldade em simular corretamente.

Para o NPA é visível no mapa de velocidades a ocorrência de uma corrente de recirculação na zona imediatamente a montante da restituição de VN III. Verifica-se, no entanto, que as velocidades máximas não ultrapassam os 0.12 m/s.

No perfil 3 os perfis são semelhantes aos obtidos para os primeiros cenários, com um escoamento distribuído por toda a largura da secção, com valores máximos perto da margem direita, por razões previamente justificadas.

O perfil 2 é constituído por uma distribuição de velocidades uniforme por quase toda a largura do canal, exceto numa faixa do lado esquerdo, que é provocada pelo muro ala de montante da estrutura de restituição de VN II, que direciona o escoamento para o lado direito.

É entre este perfil e o perfil 1 que ocorrem as maiores velocidades de recirculação, que atingem os 0.72 m/s para os dois programas ao NmE (terceira figura do apêndice A2).

No perfil 1 verifica-se que o escoamento volta a aproximar-se da margem esquerda para o NmE e para o Nmen, situação que também foi detetada em modelo reduzido. Para o NPA tal não acontece, pois o aumento da secção permite que o escoamento se processe ao longo de uma secção com maior área, e consecutivamente com menor velocidade. Este facto justifica que o fenómeno de recirculação apresentado anteriormente ocupe uma área maior (mas menor intensidade) à medida que o nível da superfície livre aumenta.

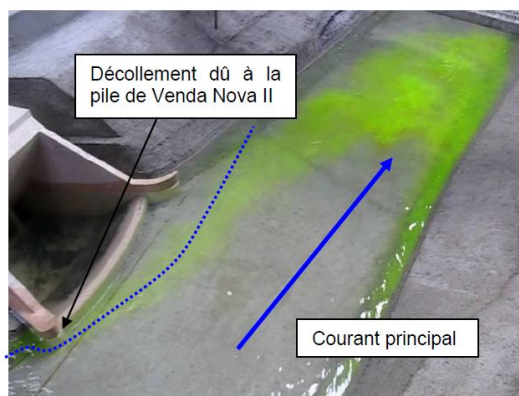


Figura 44 – Reaproximação do escoamento à margem esquerda ao NmE a jusante da restituição de VN II

Salienta-se que, para o Nmen e para o NPA, os modelos numéricos não representam de igual modo o escoamento na fronteira de jusante, pois obrigam o caudal a distribuir-se de igual modo por toda a largura da secção limite de jusante.

No GUAD 2D este comportamento origina uma recirculação na margem esquerda que depois é projetada contra o escoamento natural na zona de maior largura do canal. Esta situação diminui a largura útil do escoamento, o que provoca velocidades máximas superiores às obtidas no modelo IBER. Destaca-se que esta perturbação no escoamento não se propaga para montante, dissipando-se a cerca de 5 metros a montante do perfil 1.

Esta diferença pode ser visualizada na parte superior da Figura 45.



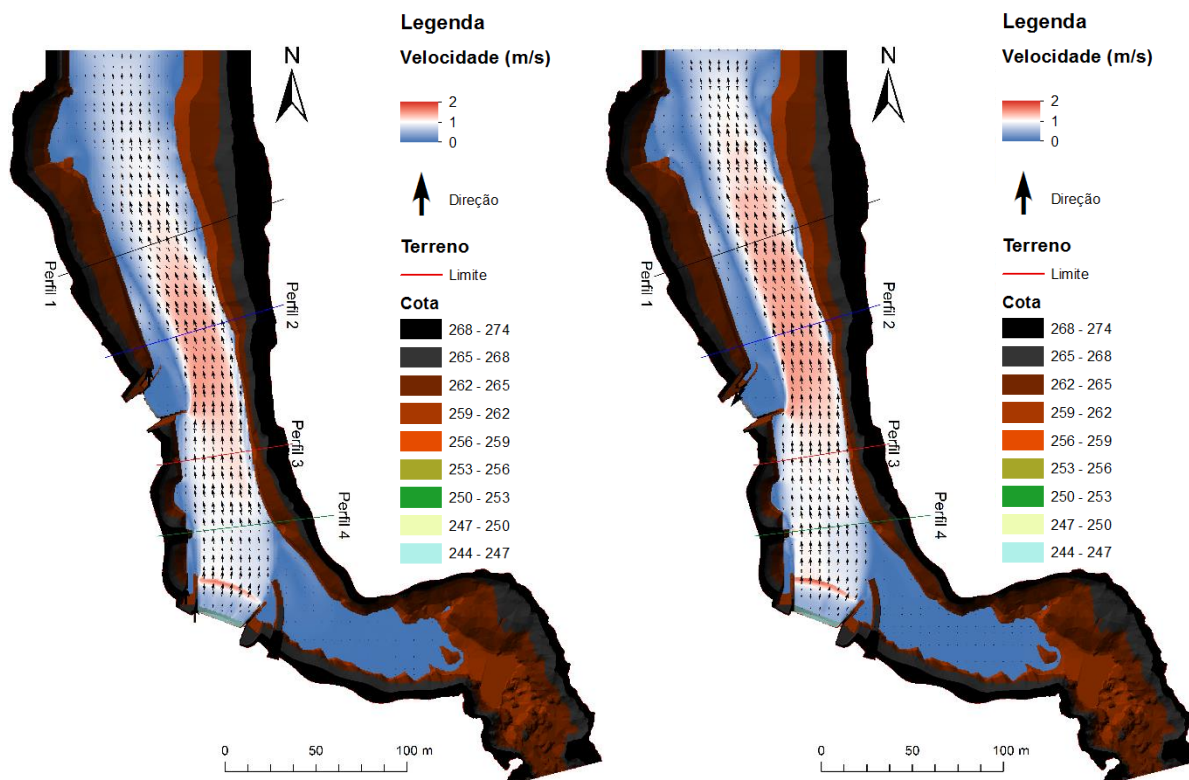


Figura 45 – Comparação do mapa de velocidades do IBER (esq.) e do GUAD 2D (dir.)

Os resultados obtidos são validados pelos resultados obtidos em modelo reduzido, havendo uma representação do escoamento semelhante em toda a extensão do modelo para o IBER e até ao início do fenómeno de recirculação perto do perfil 1, para o GUAD 2D.

Numa análise global às operações de turbinamento conclui-se que ambos os modelos representam com um bom grau de precisão todos os pormenores do escoamento, em comparação com os resultados obtidos nos ensaios em modelo reduzido.

## 6.2. OPERAÇÕES DE BOMBAGEM

### 6.2.1. BOMBAGEM EM VENDA NOVA III E BOMBAGEM EM VENDA NOVA II

As operações de bombagem dos dois grupos de VNIII (160 m<sup>3</sup>/s) e de dois grupos de VNII (40 m<sup>3</sup>/s) para os três níveis de operações característicos, NPA=(270.36), Nmen=(260.56) e NmE+0.5=(259.50), são apresentados no apêndice A3.

Salienta-se que para estas simulações o escoamento não estabiliza completamente. Os perfis de velocidade apresentados correspondem ao instante de tempo para o qual as velocidades entre as duas restituições são máximas, ou seja, quando a largura do escoamento útil é a menor, e/ou a velocidade de recirculação é máxima.

Estes cenários apresentam uma distribuição uniforme da velocidade do escoamento ao longo de toda a largura do canal desde a fronteira de jusante até à restituição de VN II (tomada de água em bombagem).

Na restituição de VN II verifica-se um campo de velocidades assimétrico, com o escoamento a seguir uma trajetória junto ao muro ala de montante para os dois níveis mais baixos, ocorrendo recirculação já dentro da estrutura, o que impede uma alimentação uniforme.

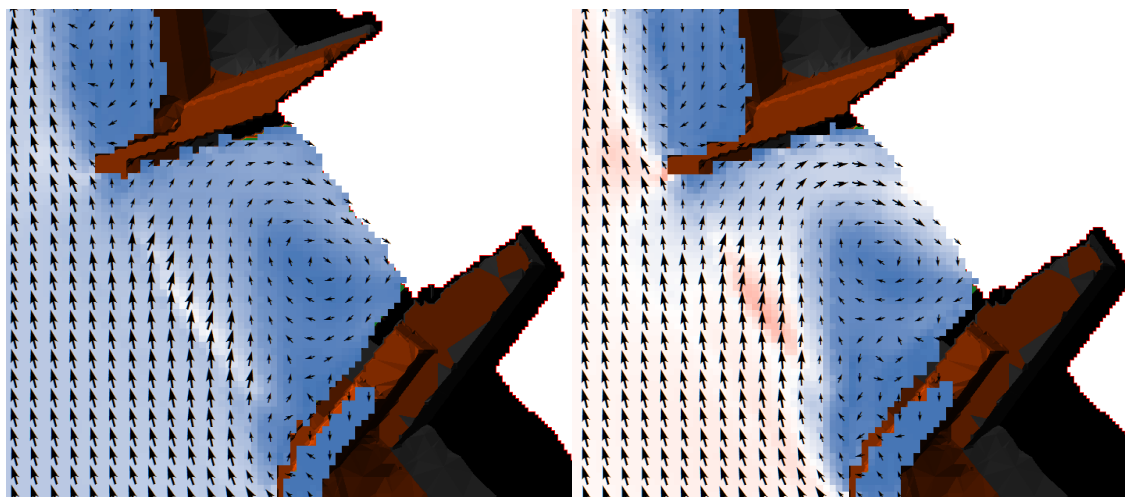


Figura 46 – Mapa de velocidades obtido no IBER, para o NmE+0.5m (esq. 3ª figura do apêndice A3) e para o Nmen (dir. 2ª figura do apêndice A3), na zona da restituição de VN II, com as escalas dos respectivos níveis.

Esta configuração é validada com os ensaios em modelo reduzido, em que o escoamento apresenta uma configuração semelhante, como se pode verificar na figura seguinte:

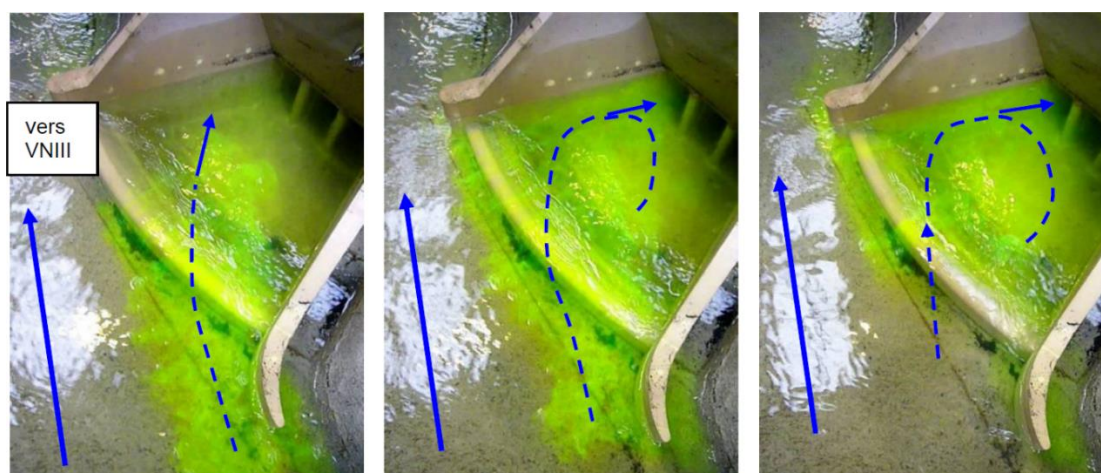


Figura 47 – Alimentação assimétrica de VN II para o NmE verificada nos ensaios em modelo reduzido (ARTELIA, 2013a).

No troço do canal entre as restituições o escoamento descola-se da margem esquerda, efeito que se visualiza principalmente para o Nmen e para o NmE+0.5 m, porque o muro ala de montante funciona como obstáculo ao escoamento. A distribuição das velocidades é, ainda assim, uniforme, com uma ligeira diferença entre os dois modelos no perfil 4, em que no GUAD 2D são detetadas velocidades de recirculação de 0.3 m/s para o Nmen que não são encontradas no IBER.

Ao longo da extensão total do modelo, o escoamento é representado de modo semelhante ao que se verificou em modelo reduzido, com algumas diferenças entre os dois modelos numéricos consideradas pouco relevantes.

A simulação de transporte de sedimentos para o Nmen (verso da 2ª página do apêndice A3) representa um movimento muito lento do material depositado no canal em direção à restituição de VN III. A entrada de sedimentos na estrutura de restituição ocorre quando os sedimentos depositados à frente da estrutura atingem uma cota quase igual à da cota de crista do lábio da restituição de VN III. Tal verifica-se no

modelo entre os 19 200 e os 19 800 segundos (5h20 min-5h30 min) após a entrada em funcionamento dos grupos.

Na restituição de VN II a entrada de sedimentos não ocorre porque a cota superior da crista do lábio da estrutura de restituição (258.00) é superior em 1 metro em relação à correspondente em VN III (257.00) e seria necessário mais tempo para que tal entrada de sedimentos ocorresse. Nos ensaios em modelo reduzido verifica-se alguma entrada de sedimentos por suspensão, devido aos fenómenos de recirculação e tal não é possível ser simulado com os modelos numéricos, pelo que se menciona esta limitação.

São verificados os resultados obtidos nos ensaios em modelo reduzido que estão descritos no relatório (ARTELIA, 2013a).

#### 6.2.2. BOMBAGEM EM VENDA NOVA III (2 GRUPOS)

O apêndice A4 representa as operações de bombagem dos dois grupos de VN III (160 m<sup>3</sup>/s), com os grupos de VN II parados, para o NPA, para o Nmen e para o NmE.

Pode-se observar um escoamento uniforme desde a fronteira de jusante até à restituição de VN II, com os dois modelos a exibirem velocidades iguais nos perfis 1 e 2.

O escoamento é estreitado pelos muros ala da restituição de VN II, principalmente pelo de montante, separando o escoamento da margem esquerda. Este fenómeno é corroborado com o que se observou em modelo reduzido.



Figura 48 – Separação do escoamento da margem esquerda para o NmE (Restituição de VN III em cima)

A diminuição da secção útil do escoamento implica um aumento da velocidade do escoamento, atingindo-se, no perfil 3 e para o NmE, valores de 1.85 m/s e 1.7 m/s no GUAD 2D e no IBER, respetivamente.

Esta diferença ocorre porque, no GUAD 2D, a secção útil do escoamento modifica-se com o tempo (Figura 49), sendo a configuração apresentada a que tem maiores velocidades. As velocidades de recirculação na margem esquerda atingem um máximo de 0.5 m/s na zona do perfil 3, no GUAD 2D.



Comparativamente ao perfil de velocidades obtido em modelo reduzido (perfil 3 da 3ª figura do apêndice A4), a configuração do escoamento é representada de modo semelhante, com os 2 resultados do lado esquerdo do canal a confirmar a existência de recirculação devido à presença do muro ala de montante da restituição de VN II que direciona o escoamento para a margem direita.

Os valores de 0.28 e 0.22 m/s correspondem a recirculações (o perfil apresenta valores absolutos) que são melhor representadas no GUAD 2D, que atinge 0.3 m/s. Os 3 resultados mais à direita validam a homogeneidade do escoamento verificada nos 2 modelos numéricos, apresentando valores para a velocidade que são ligeiramente inferiores para a zona central do canal.

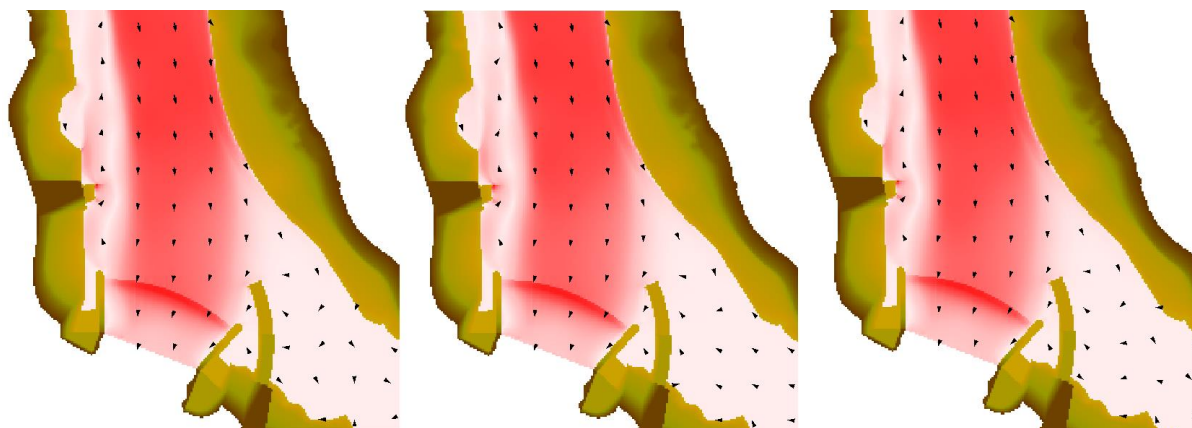


Figura 49 – Alteração do mapa de velocidades na margem esquerda com um  $\Delta t=20s$  entre figuras para o GUAD 2D (Restituição de VN III em baixo).

Para o perfil 4 a disposição da velocidade transversal ao perfil é semelhante à do perfil anterior, com os fenómenos de recirculação a terem um peso menor.

Para o funcionamento em bombagem dos dois grupos de VN III os resultados obtidos nos dois modelos são semelhantes (apesar de serem detetadas maiores diferenças para estes cenários que para os cenários de turbinamento) e compatíveis com os obtidos em modelo reduzido, principalmente no GUAD 2D que representa com maior precisão a recirculação junto à margem esquerda.

Quanto à simulação com transporte de sedimentos ao Nmen, é visível um comportamento semelhante ao cenário anterior: observa-se um transporte lento em direção à restituição de VN III com entrada de sedimentos para o interior da estrutura entre as 5 horas e as 5 horas e 10 minutos após a entrada em funcionamento dos grupos.

O instante de tempo em que começa a haver entrada de sedimentos ocorre ligeiramente mais rápido para este cenário porque as velocidades no canal entre as restituições são ligeiramente superiores, resultantes de uma menor secção útil do escoamento que não se verificava com o funcionamento em bombagem de VN II.

### 6.2.3. BOMBAGEM EM VENDA NOVA III (1 GRUPO)

O apêndice A5 é dedicado à operação de bombagem de um grupo em VN III, totalizando 80 m<sup>3</sup>/s, para o NPA, Nmen e NmE.

A análise deste grupo de resultados permite concluir que a configuração do escoamento é semelhante à observada no cenário anterior (2 grupos em bombagem), mas com velocidades inferiores. O escoamento é uniforme desde a fronteira de jusante até à restituição de VN II, onde o muro ala de montante provoca a separação do escoamento da margem esquerda, havendo recirculação do escoamento.

As velocidades máximas são encontradas no perfil 3 na zona central do canal para o NmE, sendo de 0.9 m/s no GUAD 2D e de 0.83 m/s no IBER. A situação mais desfavorável situa-se no perfil 4, adjacente ao encontro da ensecadeira que foi demolida, com velocidades de recirculação de 0.3 m/s, que, dado que a escala de cores utilizada para o NmE é mais abrangente, apenas se consegue verificar pela observação no perfil 4.

Também na zona do perfil 4 ocorre a mesma situação verificada nos cenários de bombagem já analisados: o GUAD 2D representa um fenómeno de recirculação junto à margem esquerda que não ocorre no IBER. Para este cenário as velocidades são baixas, logo o fenómeno não tem grande influência no escoamento efetivo, sendo mais notável a níveis mais baixos.

As simulações de transporte de sedimentos para o Nmen (verso da 2ª figura do apêndice A5) permitem concluir que não há problemas na exploração dos aproveitamentos nestas condições. O transporte de sedimentos é muito menor que nos cenários anteriores e não se verifica entrada de sedimentos para o interior da restituição de VN III. A acumulação de sedimentos junto ao lábio da estrutura ao fim de 10 horas de simulação estabiliza 16 centímetros, quando seria necessário atingir 1 metro para igualar a cota da crista do lábio e assim permitir a entrada de sedimentos para o interior da estrutura.

Numa análise geral aos cenários de bombagem, pode-se concluir que ambos os modelos representam com um bom grau de confiança o escoamento no canal para todos os casos aqui testados. Os resultados obtidos em modelo reduzido são semelhantes aos alcançados nos modelos numéricos, atendendo, contudo, ao facto de a maioria dos resultados disponíveis dos ensaios em modelo reduzido permitirem apenas uma análise visual.

A zona que apresenta uma ligeira diferença entre os dois modelos numéricos é a zona do encontro de jusante da ensecadeira provisória: no IBER, junto à margem esquerda, as velocidades são reduzidas e têm a mesma direção do escoamento enquanto no GUAD 2D as velocidades têm direção oposta à do escoamento útil. Estes pormenores ocorrem para todos os níveis e com velocidades superiores para níveis mais baixos.

Um fator que condiciona a configuração do escoamento nessa zona é a estrutura remanescente do encontro da ensecadeira. Essa estrutura funciona como um esporão de pequenas dimensões e origina uma curta diminuição da secção do canal que provoca uma mudança de direção do escoamento.

Para cenários de turbinamento esta estrutura não influencia o escoamento porque os dois muros ala da restituição de VN III condicionam a direção do mesmo.

### **6.3. OPERAÇÕES DE TURBINAMENTO E BOMBAGEM SIMULTÂNEAS**

#### **6.3.1. TURBINAMENTO EM VENDA NOVA II E BOMBAGEM EM VENDA NOVA III**

O primeiro grupo de cenários corresponde à utilização dos dois grupos de VN III (160 m<sup>3</sup>/s) em modo de bombagem e de apenas um grupo de VN II (25 m<sup>3</sup>/s) em turbinamento, correspondentes ao apêndice B1 para o NPA=(270.36) e para o Nmen=(260.56).

Segundo a lei da continuidade, os grupos de VN III serão alimentados por 135 m<sup>3</sup>/s (dos 160 m<sup>3</sup>/s bombados) provenientes da albufeira de Salomonde, o que corresponde a cerca de 85% do caudal de alimentação de VN III. A influência que o caudal turbinado em VN II tem no trecho do canal entre as duas obras de restituição não é tão elevada quando comparada com os cenários seguintes.

Observa-se nos perfis 1 e 2 um escoamento bem distribuído por toda a largura do canal até à restituição de VN II.

O caudal turbinado em VN II é estreitado contra o muro ala de montante da respetiva restituição, obtendo-se velocidades de 1.4 m/s ao Nmen após o lábio da estrutura.

Ocorre uma diminuição da largura útil do escoamento entre as restituições para estes cenários em relação aos casos em que VN II não turбина, pois o escoamento proveniente deste aproveitamento é direcionado para a margem direita do rio Rabagão, comprimindo o escoamento proveniente da albufeira. Verifica-se então um aumento da velocidade nos perfis 3 e 4, sendo registado no perfil 3 um valor máximo de 1.35 m/s para o Nmen a cerca de 3 metros da margem direita.

Apesar de as velocidades serem superiores às obtidas para os respetivos níveis nos cenários de calibração, são inferiores às velocidades máximas obtidas para o NmE. No entanto ocorrem mais perto da margem direita do canal, pelo que são mais passíveis de provocar erosão da margem.

Entre as duas restituições, junto à margem esquerda do rio Rabagão, ocorre um fenómeno de recirculação do escoamento, provocado essencialmente pela concentração do escoamento principal junto à margem direita. As velocidades de recirculação não ultrapassam 0.3 m/s em ambos os modelos.

A simulação de transporte de sedimentos para o Nmen (verso da 2ª figura do apêndice B1) permite visualizar um movimento lento dos sedimentos no sentido do escoamento. É perceptível a remoção de sedimentos junto ao muro ala de montante da restituição de VN II e a deposição de sedimentos a montante da restituição de VN III.

Quando o nível superior da camada de sedimentos se encontra muito próximo da cota da crista do lábio da restituição de VN III começa a haver entrada de sedimentos para o interior da estrutura de restituição. Este fenómeno tem início 4 horas após o início da simulação. Este instante de tempo é inferior ao que se verifica quer para os cenários de turbinamento quer para os cenários de bombagem, significando que estas operações requerem cuidados acrescidos na presença de sedimentos.

O apêndice B2 apresenta resultados de cenários de bombagem e turbinamento em simultâneo em VN III (160 m<sup>3</sup>/s) e VN II (50 m<sup>3</sup>/s) para o NPA e para o Nmen, apresentados por esta ordem no apêndice.

Em relação aos resultados anteriores destaca-se que os perfis 1 e 2 apresentam velocidades inferiores, uma vez que o caudal de abastecimento a VN III proveniente da albufeira é menor.

Os resultados obtidos para estes cenários requerem uma análise mais profunda, principalmente no que se refere ao cenário ao Nmen, pois apesar de detetadas velocidades máximas de cerca de 1.44 m/s no sentido do escoamento para o perfil 3 e de 0.5 m/s relativos a recirculação no perfil 4, o escoamento não chega a estabilizar entre as duas restituições. Este facto implica uma análise ao longo do tempo de simulação para determinar qual o instante de tempo e os locais onde poderão ocorrer fenómenos que possam limitar a exploração do sistema.

Os resultados dos perfis 3 e 4 para a velocidade transversal ao perfil são coerentes quando comparados com os cenários em que VN II apenas tem um grupo a turbinar, pois observa-se uma largura do escoamento útil menor e velocidades máximas superiores para os cenários agora analisados.

Após uma análise do trecho do canal situado entre as restituições, principalmente do lado esquerdo, onde ocorrem fenômenos de recirculação, foram detetadas nos dois modelos, para o Nmen, velocidades de 0.55 m/s entre o muro ala esquerdo da restituição de VN III e o encontro de jusante da ensecadeira muito perto das margens (ligeiramente superiores aos verificados no perfil 4). Ambos os programas permitem a apresentação da envolvente dos valores máximos para a velocidade. Com esta ferramenta, detetou-se, para o Nmen, valores para a velocidade de recirculação de 0.7 m/s nesse local, mas a uma distância superior a 2 metros da margem esquerda.

Para estas operações retém-se o pormenor da existência de velocidades com valores superiores junto às margens do canal para o Nmen entre as duas restituições.

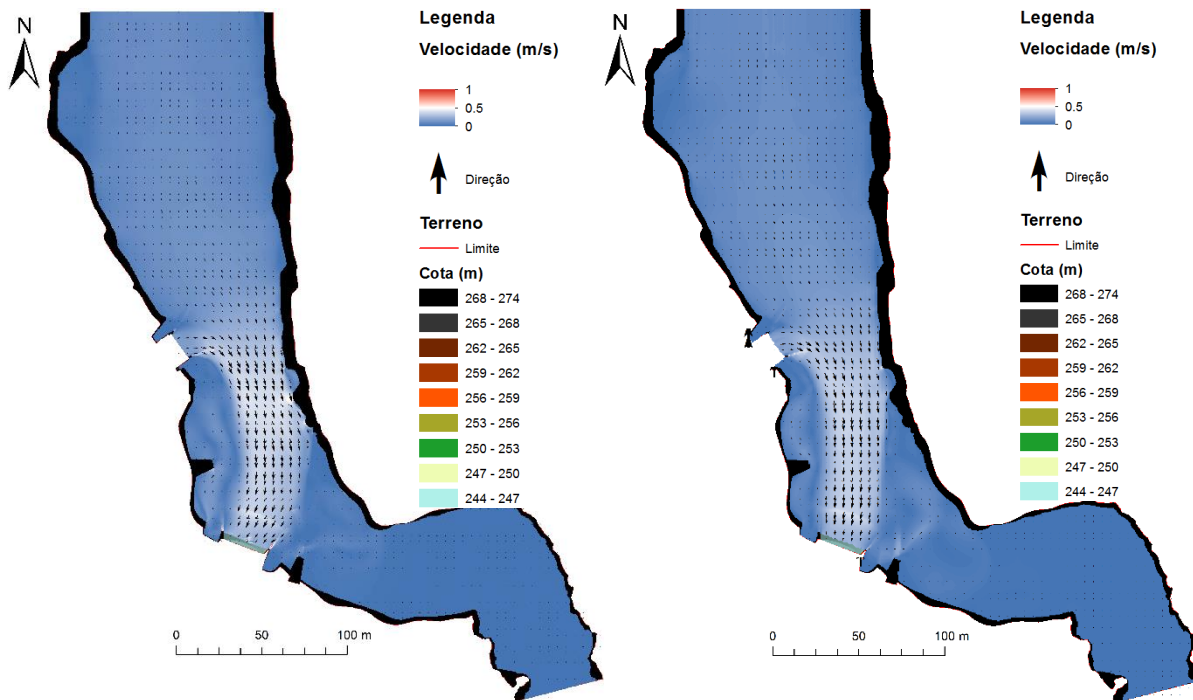


Figura 50 – Comparação do mapa de velocidades obtido no GUAD 2D (esq.) e no IBER (dir.)

Na figura acima é possível observar que existem diferenças entre os dois modelos: para o GUAD 2D o escoamento útil efetua-se mais à direita e os fenômenos de recirculação junto à margem esquerda são mais acentuados. Para o IBER, a estabilização do modelo inclui uma recirculação do lado direito do canal de menor intensidade, verificando-se velocidades máximas sobre a ensecadeira de apenas 0.21 m/s.

A análise de transporte de sedimentos para este cenário ao Nmen (verso da 2ª figura do apêndice B2) permite verificar uma evolução dos fundos semelhante à do cenário anterior, com destaque para a entrada de sedimentos para o interior da restituição de VN III. Comparativamente aos cenários com bombagem já apresentados, este é o mais crítico, pois a entrada de sedimentos para o interior da estrutura ocorre para um instante de simulação inferior ao dos restantes cenários (entre 3 h 20 min e 3 h 30 min).

Apresentam-se de seguida dois gráficos comparativos do cenário R0\_Nmen\_BIII160\_BII40, de calibração, com o cenário R0\_Nmen\_BIII160\_TII50. Os pontos de obtenção dos dados são os mesmos para os dois cenários: um exterior à estrutura e adjacente ao lábio da restituição de VN III e outro já no interior da referida estrutura, ambos no eixo de simetria da estrutura.

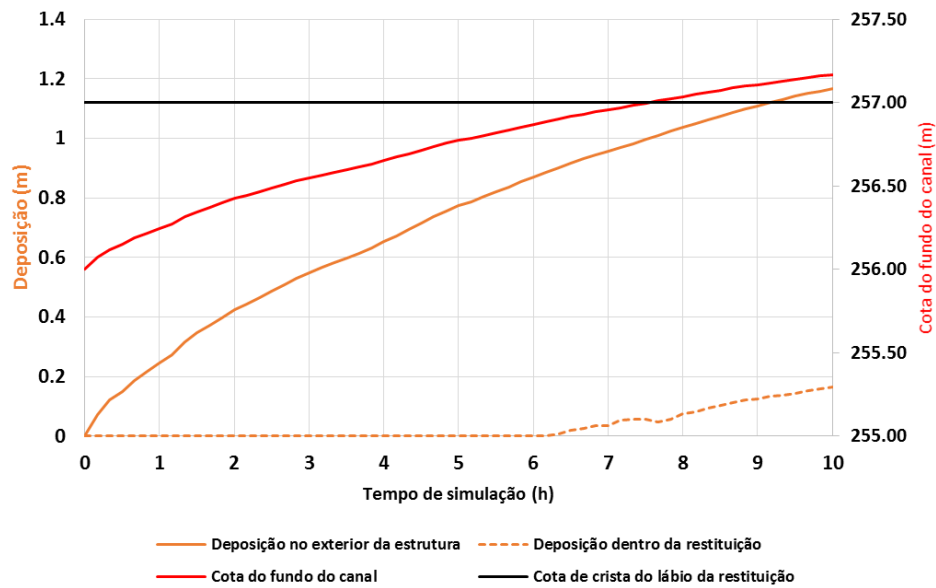


Figura 51 - Evolução do fundo do canal junto ao lábio da estrutura de restituição de VN III para o cenário R0\_Nmen\_BIIII160\_BII40

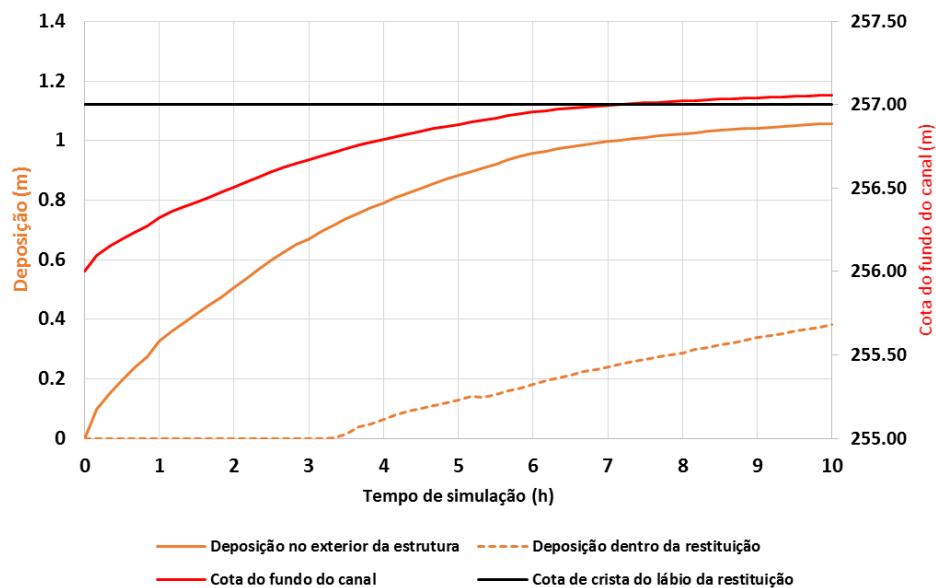


Figura 52 – Evolução do fundo do canal junto ao lábio da estrutura de restituição de VN III para o cenário R0\_Nmen\_BIIII160\_TII50

É possível verificar que em ambos os casos a cota do fundo do canal (cota máxima de sedimentos) ultrapassa a cota da crista do lábio da restituição de VN III, ocorrendo mais rapidamente para o segundo cenário. O valor máximo da deposição atingido no segundo caso é inferior ao do primeiro, apesar de haver maior entrada de sedimentos, porque a configuração do escoamento difere entre os dois casos e porque as velocidades são maiores para o cenário em que VN II se encontra a turbinar, que faz com que possa haver entrada de sedimentos para o interior da estrutura para uma menor deposição junto à estrutura.

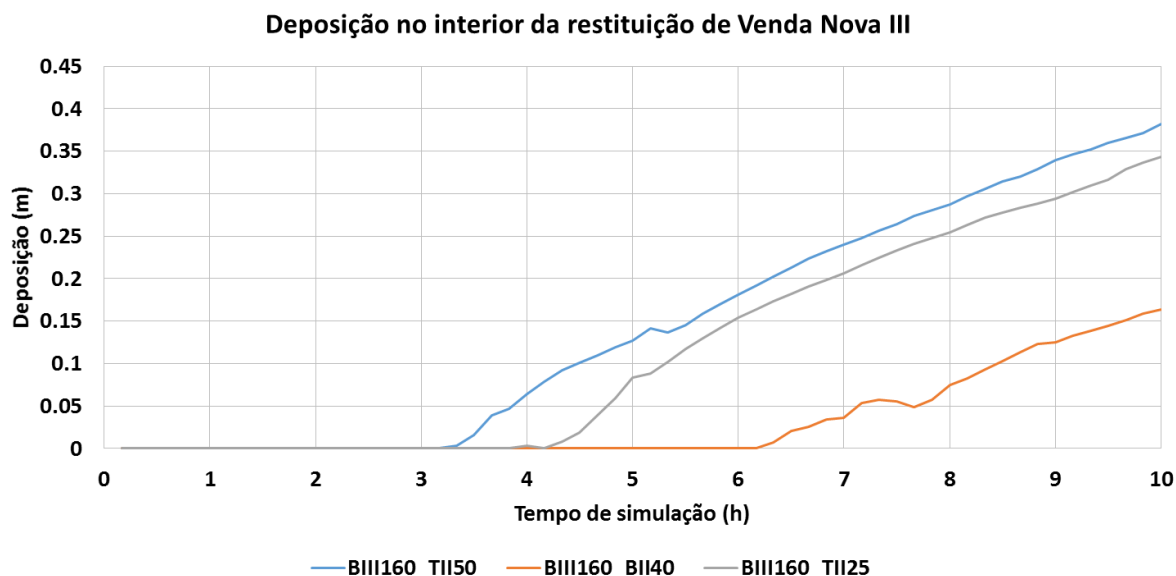


Figura 53 – Comparação da deposição de sedimentos no interior da estrutura de restituição de VN III

Na Figura 53 é perceptível a entrada de sedimentos para o interior da restituição entre as 3 e as 4 horas de simulação para o presente cenário, muito antes do que se verificava no cenário com bombagem nos dois aproveitamentos e quase 1 hora antes do instante para o qual este fenómeno se verificou para o cenário em que só 1 grupo turbinava em VN II.

Como é observada a entrada de sedimentos para o interior da restituição de VN III, os dois cenários de operações de turbinamento (em VN II) e bombagem (em VN III com dois grupos) em simultâneo foram simulados para uma cota superior, para verificar se o mesmo fenómeno se verifica, definindo-se a cota (265.00) como ponto de partida.

O apêndice B3 apresenta a evolução do transporte de sedimentos para a cota (265.00). Para operações de bombagem de dois grupos em VN III ( $160 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e para operações de turbinamento de 1 e 2 grupos em VN II ( $25$  e  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , respetivamente).

O escoamento apresenta a mesma configuração presente para o NPA e para o Nmen em ambos os cenários, com velocidades superiores às que ocorrem para o NPA mas menores que as verificadas ao Nmen.

No verso do mapa de velocidades é apresentada a evolução dos fundos durante 6 horas. Os resultados demonstram um transporte de sedimentos muito menor, quase não perceptível visualmente. A acumulação máxima de sedimentos junto à restituição de VN III atinge os 0.11 e 0.10 metros para o funcionamento de 1 ou 2 grupos em bombagem em VN II para as 6 horas de simulação. Face aos resultados obtidos pode-se afirmar que, para este nível da superfície livre não se considera necessário impor limitações à exploração do sistema.

O apêndice B4 é relativo a operações de turbinamento de dois grupos em VN II que totalizam  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  e à bombagem de  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  por um grupo de VN III, para o NPA e para o Nmen.

Nestes cenários o escoamento proveniente da albufeira tem menos influência que o caudal turbinado em VN II pelo que o escoamento ocorre mais perto da margem direita do canal. No entanto, as velocidades

são menores quando comparados com o funcionamento de dois grupos em bombagem em VN III, porque os caudais neste cenário são inferiores aos dos cenários anteriores.

Pela mesma razão, as velocidades máximas do escoamento são inferiores às dos casos anteriores e os valores máximos não ocorrem junto às margens, o que atenua possíveis problemas de erosão das margens. No cenário com o nível igual ao Nmen, os valores máximos ocorrem no perfil 3, apresentando-se 0.8 m/s no GUAD 2D a cerca de 2 metros da margem direita.

Quanto à recirculação na margem esquerda, a velocidade atinge 0.4 m/s no GUAD 2D e a direção do escoamento não é constante, havendo projeção do caudal de recirculação contra o escoamento útil, como o verificado na figura seguinte.

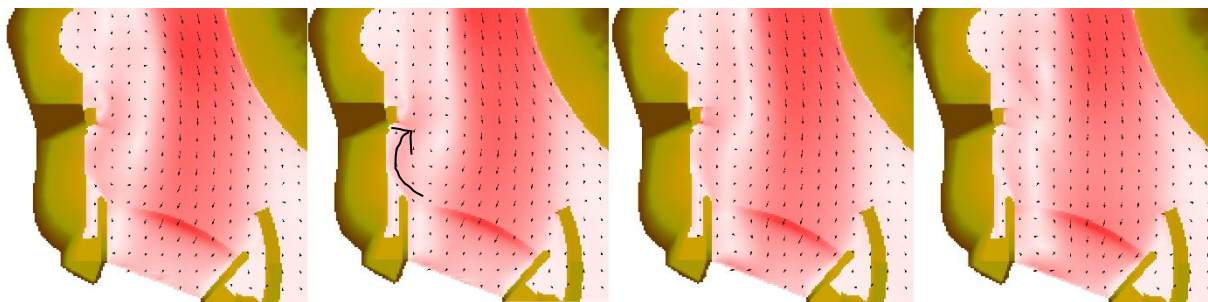


Figura 54 – Variação da configuração do escoamento com o tempo (GUAD 2D)

Quanto à comparação dos dois modelos, pode-se concluir que ambos apresentam resultados similares entre si, seguindo a linha de conclusões dos cenários prévios: velocidades máximas são ligeiramente superiores no GUAD 2D para os perfis 3 e 4 e há uma pequena diferença da configuração do escoamento junto à margem esquerda.

O apêndice B5 corresponde ao funcionamento de um grupo em bombagem em VN III ( $80 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e ao funcionamento de um grupo em turbinamento em VN II ( $50 \text{ m}^3/\text{s}$ ) para o NPA e para o Nmen.

Tal como para os cenários em que apenas 1 grupo de VN III funciona em bombagem, o escoamento é uniforme, com velocidades baixas desde a fronteira de jusante até à restituição de VN II. O funcionamento de apenas um grupo em ambos os aproveitamentos resulta em velocidades inferiores para ambos os níveis em relação aos cenários anteriores, obtendo-se valores máximos de 0.72 m/s no GUAD e de 0.66 m/s no IBER no perfil 3, para o Nmen.

As velocidades de recirculação junto à margem esquerda são sempre inferiores a 0.35 m/s, obtendo-se este valor junto ao encontro da ensecadeira, a 3 metros do perfil 3 para o Nmen.

### 6.3.2. BOMBAGEM EM VENDA NOVA II E TURBINAMENTO EM VENDA NOVA III

O apêndice B6 é referente ao modo de funcionamento de 2 grupos em turbinamento em VN III ( $200 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e ao funcionamento em bombagem de 1 grupo em VN II ( $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ) para o NPA=(270.36) e para o Nmen=(260.56), por esta ordem.

Similares aos cenários com turbinamento em ambos os aproveitamentos, verificam-se velocidades superiores junto à margem esquerda no perfil 4, com o escoamento direcionado da margem esquerda para a margem direita. Por esse motivo e devido ao muro ala de montante de VN II, no perfil 3 a velocidade é superior do lado direito do canal.



Na zona da restituição de VN II o comportamento do escoamento apresenta diferenças entre o NPA e o Nmen. Para o NPA o nível da água é superior à cota máxima dos muros ala e o funcionamento em bombagem de VN II provoca uma concentração de escoamento nesse local e, por isso, verificam-se velocidades de 1 m/s nos 2 modelos sobre o muro ala de montante.

Para o Nmen, a cota máxima do muro ala é superior à cota da superfície livre, e isso funciona como obstáculo ao escoamento provocando um afastamento do escoamento da margem esquerda e da restituição de VN II. Desta singularidade resulta que o caudal para bombagem em VN II se concentra junto ao muro ala de jusante.

Para este nível, o comportamento referido origina um campo de velocidades assimétrico em VN II superior ao que ocorre ao NPA, com recirculação dentro da estrutura. As velocidades máximas são de 1.6 m/s nos dois modelos no lábio da estrutura de restituição.

A jusante da restituição de VN II verifica-se um escoamento uniformemente distribuído pela largura total do canal para o Nmen enquanto para o NPA há uma concentração do escoamento no meio do canal e recirculação em ambas as margens, com um valor máximo para a velocidade de recirculação de 0.15 m/s, ou seja, muito reduzido.

A simulação com fundos móveis ao Nmen representa uma movimentação lenta dos sedimentos depositados na direção do escoamento. Na zona em frente à restituição de VN III há remoção parcial do material depositado, com este material a mover-se lentamente para jusante.

Na zona da restituição de VN II há acumulação de sedimentos junto ao lábio da referida estrutura que totaliza 0.81 metros. Com a cota de sedimentos igual a (256.00) no instante inicial, a acumulação fica ainda a 1.19 metros de atingir a crista do lábio da estrutura de restituição de VN II. Esta acumulação ocorre junto ao muro ala de jusante da referida estrutura, zona onde se concentra o escoamento, e não é suficientemente grande para que se verifique entrada de sedimentos para o interior da estrutura de restituição.

O apêndice B7 refere-se ao funcionamento de dois grupos em turbinamento, em VN III (200 m<sup>3</sup>/s), e de dois grupos em modo de bombagem, em VN II (40 m<sup>3</sup>/s), para o NPA e para o Nmen.

Como seria expectável, a configuração do escoamento desde a restituição de VN III até à restituição de VN II é muito semelhante à dos cenários anteriores, para ambos os níveis, pois o caudal nessa extensão é o mesmo. Para o Nmen, são atingidas velocidades máximas de 1.15 m/s junto à margem direita do perfil 3 e margem esquerda do perfil 4, respetivamente.

Na zona da restituição de VN II, a configuração do escoamento difere um pouco em relação aos cenários do apêndice B6. O caudal de bombagem é o dobro daqueles cenários e, consecutivamente, tem mais influência na distribuição do escoamento junto à estrutura. Isto faz com que o escoamento útil dentro da estrutura ocupe uma área superior à obtida nesses cenários, diminuindo a assimetria do campo de velocidades junto à restituição de VN II. Para o NPA, o escoamento concentra-se na zona central da restituição e para o Nmen a curvatura do escoamento não é tão acentuada como no cenário anterior, apesar de também se concentrar junto ao muro ala de jusante.

Comparativamente as velocidades também são superiores para os dois níveis, principalmente para o Nmen, quer em frente à estrutura de restituição de VN II, quer sobre o lábio da mesma, atingindo valores máximos de 1.66 m/s e de 1.92 m/s, respetivamente, podendo-se comparar visualmente na Figura 55. Destaca-se que os modelos utilizados não permitem verificar se ocorre vorticidade e/ou se há entrada de ar para o interior da restituição de VN II.



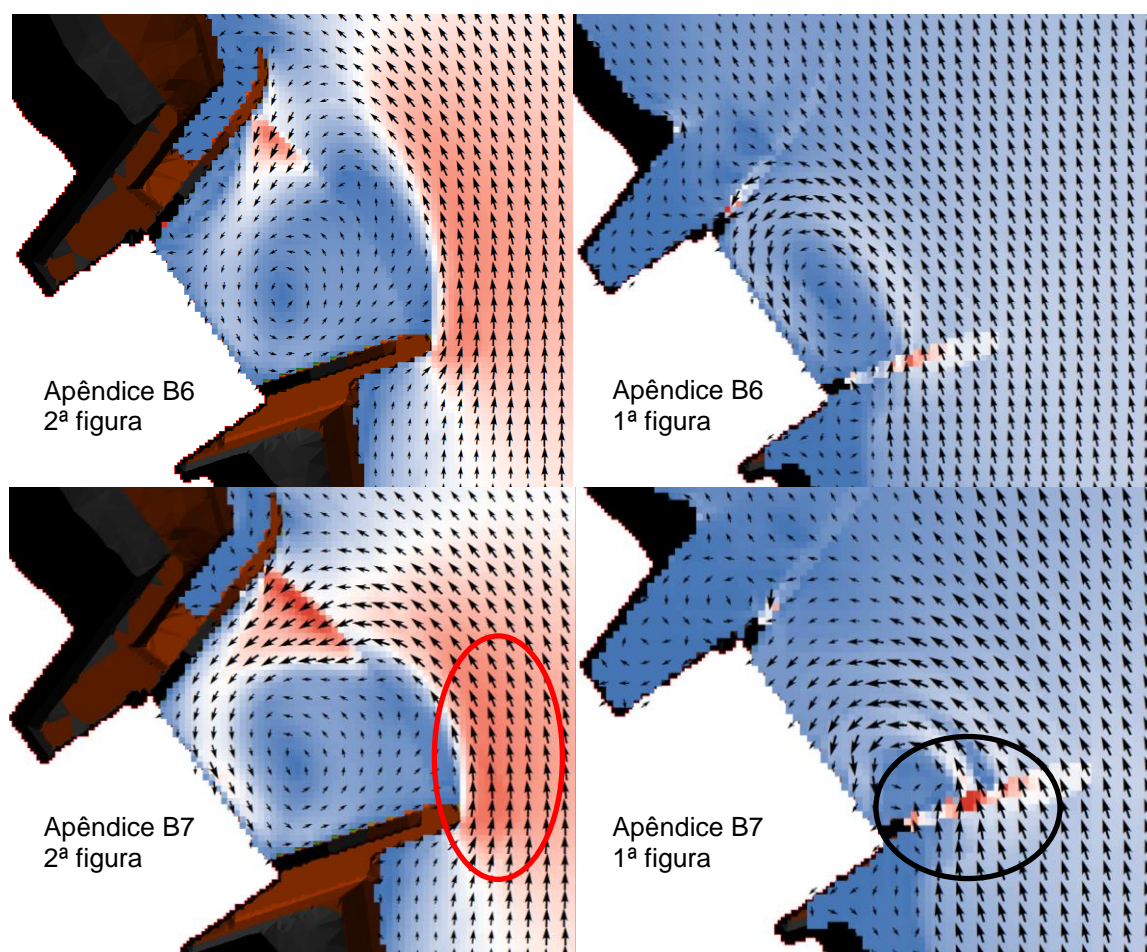


Figura 55 – Pormenor do campo de velocidades obtidos no GUAD 2D para o Nmen (esq.) e para o NPA (dir.), e para turbinamento em VN II de 20 m<sup>3</sup>/s (em cima) e 40 m<sup>3</sup>/s (em baixo), com escalas dos respectivos níveis.

As simulações ao NPA resultaram em valores baixos para as velocidades no canal, sempre inferiores a 0.45 m/s. As velocidades são superiores sobre o muro ala de montante, pois a profundidade aí é menor e há concentração de caudal direccionado para a restituição de VN II.

No entanto, é visível na circunferência preta da Figura 55 uma concentração do escoamento num conjunto de células quando tal não é espectável. Uma malha com células de menor dimensão pode ser a solução para atenuar este problema. As velocidades máximas nesse troço são de 0.89 m/s no IBER e de 0.95 m/s no GUAD 2D.

A velocidade atinge 1.7 m/s na fronteira entre o canal natural e a zona em betão da obra de restituição (circunferência vermelha da Figura 55). Não é desejável que o escoamento se concentre demasiado num ponto das grades. Este aspeto não pode ser avaliado corretamente com estes modelos, sendo, no entanto previsível que ocorra, tendo em consideração que foi detetado nos ensaios em modelo reduzido nos cenários de bombagem dos dois aproveitamentos.

Na extensão do canal a jusante da restituição de VN II é observado um escoamento concentrado na zona central do canal para ambos os níveis, ou seja, com velocidades baixas junto às margens. Para o NPA, verifica-se um desfasamento da distribuição das velocidades entre os dois programas, semelhante ao apurado no cenário anterior: o escoamento útil concentra-se mais à direita no IBER, comparativamente ao GUAD. Este fenómeno pode ser observado nos perfis 1 e 2.

Os resultados da simulação de transporte de sedimentos obtidos para este cenário ao Nmen são visualmente iguais quando comparando o funcionamento em bombagem de 1 ou 2 grupos em VN II. Há transporte de sedimentos de montante para jusante na zona central do canal, com a exceção da zona da restituição de VN II, onde há acumulação de sedimentos no exterior da estrutura devido a operações de bombagem. A acumulação de sedimentos junto ao muro ala de jusante fica-se pelos 0.86 metros, um valor pouco superior ao cenário anterior e que não é suficiente para haver entrada de sedimentos para o interior da estrutura de restituição.

Uma limitação do modelo utilizado é que, tendo em conta os fenómenos de recirculação junto à restituição de VN II, é possível o transporte de sedimentos por suspensão e tal simulação não foi possível de se efetuar com o modelo utilizado.

O apêndice B8 representa o funcionamento em turbinamento de 1 grupo em VN III (100 m<sup>3</sup>/s) e o funcionamento em bombagem de 2 grupos em VN II (40 m<sup>3</sup>/s), primeiro para o NPA e depois para o Nmen.

A velocidade do escoamento é superior do lado esquerdo do canal para o perfil 4, pois o lado esquerdo do perfil 4 está mais próximo da restituição de VN III e a parte direita do perfil já não é ocupada pelo caudal útil. No perfil 3 as velocidades são ligeiramente superiores no lado direito do canal, pelas mesmas razões explicadas em situação de turbinamento em VN III.

Para o NPA ocorre um afastamento do escoamento da margem direita do canal cerca de 30 metros a montante da obra de restituição de VN II (incluindo a zona do perfil 3), explicada pelo facto de o caudal de bombagem possuir uma grande influência no escoamento no canal, devido à diminuição do caudal turbinado.

A maior preponderância do caudal bombado em VN II implica uma melhor distribuição do caudal dentro da estrutura de restituição em relação aos cenários anteriores. Para o NPA, o escoamento faz-se sobre o muro ala de montante e esse fator associado ao máximo caudal de bombagem em VN II permitem um campo de velocidades próximo do simétrico junto à restituição.

Ainda para o NPA, é visível no gráfico relativo ao Perfil 2 o escoamento concentrado do lado esquerdo do canal a jusante da restituição de VN III. Isto é o resultado da bombagem de VN II, que direciona o escoamento para a margem esquerda, e de o muro ala de jusante se encontrar a uma cota inferior à da superfície livre. Para o Nmen, os muros ala de jusante já funcionam como obstáculo, pelo que o escoamento se concentra mais próximo da margem direita.

As velocidades máximas ocorrem numa zona central do canal para todos os perfis, evitando possíveis problemas de erosão das margens. A exceção é o perfil 4, em que no GUAD 2D existe um pico junto à margem esquerda, relativo ao encontro de jusante da ensecadeira provisória.

Durante essa pequena extensão a altura do escoamento é muito baixa e isso provoca o aumento de velocidade. Esse pormenor já foi referido para cenários anteriores.

As velocidades encontradas são inferiores ao longo de toda a zona de estudo, comparativamente aos cenários em que o caudal turbinado é de 200 m<sup>3</sup>/s e por isso não apresenta pormenores de grande relevância.

O apêndice B9 é relativo ao funcionamento de um grupo em turbinamento em VN III (100 m<sup>3</sup>/s) e um grupo em bombagem em VN II (20 m<sup>3</sup>/s), primeiro para o NPA e depois para o Nmen.

Os perfis 3 e 4 são muito semelhantes aos obtidos nos 3 cenários anteriores, com velocidades uniformes ao longo de toda a largura do canal.

As configurações do escoamento junto à estrutura de restituição de VN II voltam a diferenciar-se das obtidas quando o caudal bombado era o dobro: o caudal concentra-se mais junto ao muro ala de jusante com um fenómeno de recirculação dentro da estrutura que, para o Nmen, ocupa maior área.

Para o NPA a configuração do escoamento difere entre os dois modelos. No GUAD 2D a restituição é abastecida, em parte, por água resultante de recirculação junto à margem esquerda, o que difere bastante do que acontece com o IBER.

Este problema é causado pela condição fronteira, que obriga a uma distribuição uniforme do caudal ao longo de toda a largura do canal e, possuindo a altura e largura do escoamento dimensões elevadas, para um caudal baixo essa distribuição provoca fenómenos de recirculação em ambas as margens.

Já se verificou uma situação semelhante nos cenários anteriores com menos importância, mas o baixo caudal permite que a recirculação se propague para montante e assim seja fonte de abastecimento de VN II.

A Figura 56 compara os mapas de velocidade obtidos nos dois programas, em que é evidente a concentração do escoamento no centro do canal para o GUAD 2D enquanto no IBER existe uma distribuição ao longo de todo o canal.

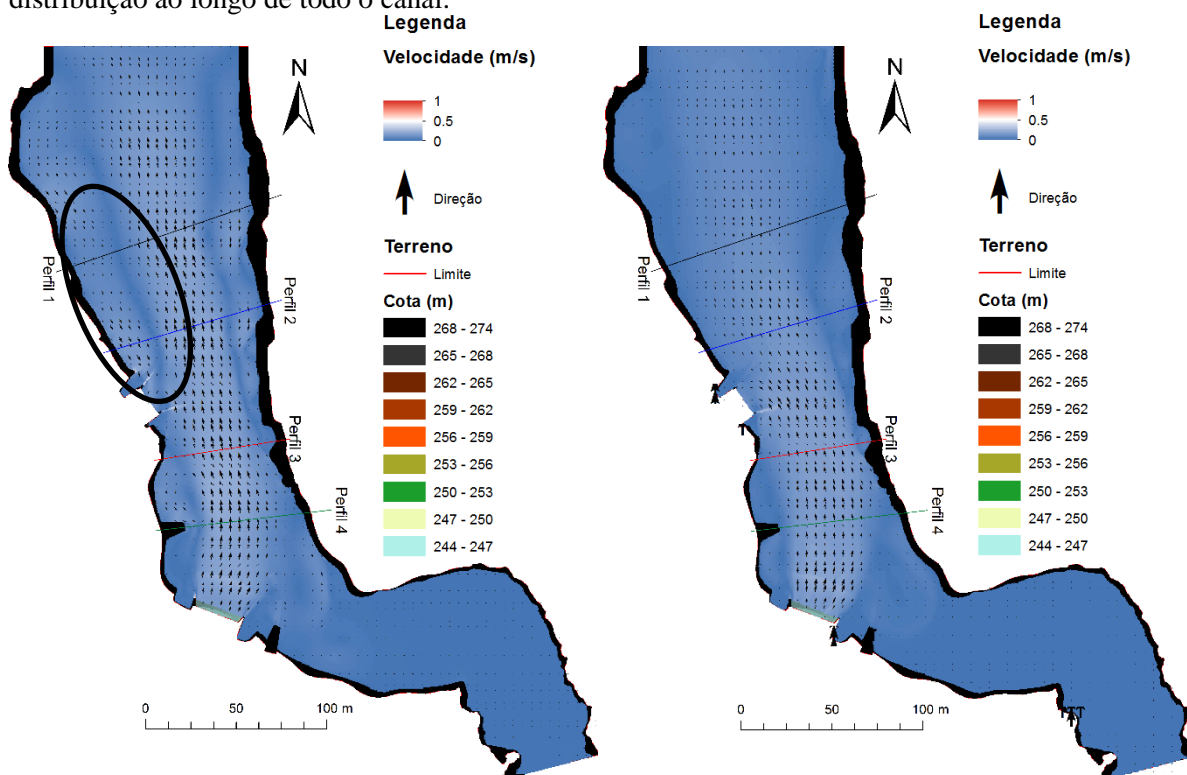


Figura 56 – Mapa de Velocidades obtido no GUAD 2D (esq.) e no IBER (dir.)

Porém, as velocidades nesse troço do canal são baixas e não apresentam limitações à exploração dos aproveitamentos, quer para o NPA onde não se obteve resultados iguais para os dois programas, quer para o Nmen.



# 7

## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 7.1. CONCLUSÕES

O estudo realizado neste trabalho tem como objetivo principal a simulação hidrodinâmica de operações de turbinamento e bombagem simultâneas no canal de restituição dos reforços de potência de Venda Nova. Foram utilizados modelos numéricos 2D para a simulação de escoamentos com superfície livre: o GUAD 2D e o IBER.

A aplicação ao canal de restituição de Venda Nova II e Venda Nova III permitiu, recorrendo a resultados existentes, nomeadamente nos ensaios em modelo reduzido, validar e verificar a adequabilidade desses modelos ao caso de estudo.

Estando os modelos validados, estes foram utilizados para simular operações de turbinamento e bombagem simultâneas, que não haviam sido previstas na fase de projeto.

Dessas simulações, e da análise de resultados, foi possível inferir se o sistema existente tem a potencialidade de operações complexas como as de turbinamento e bombagem em simultâneo, desta forma aumentando a flexibilidade de operação dos aproveitamentos hidroelétricos.

Neste contexto foi também testado um módulo de simulação de transporte de sedimentos por arrastamento, disponível no IBER, para verificar a influência dos sedimentos na exploração dos aproveitamentos hidroelétricos e o seu comportamento.

Da análise de resultados, apresentados no capítulo 6, é possível retirar as seguintes conclusões:

A precisão utilizada para os dois modelos, um pouco superior para o GUAD 2D, é suficiente para representar bem o escoamento no canal para os cenários de operações de turbinamento e bombagem simples, verificando-se apenas divergências localizadas entre os dois modelos.

Os resultados obtidos através de modelos numéricos são validados com os obtidos nos ensaios em modelo reduzido correspondentes a cenários de turbinamento ou bombagem simultâneos em Venda Nova II e Venda Nova III e permitem alcançar as mesmas conclusões. Por este motivo, conclui-se que o uso de células com  $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$  de área em ambos os programas computacionais (GUAD 2D e IBER) permite representar bem os fenómenos complexos que se verificam na zona estudada. Assegura-se, deste modo, a adequabilidade dos modelos utilizados ao caso de estudo.

Não obstante, são detetadas situações singulares em que há uma ligeira diferença entre os modelos que se encontram explicitadas nos capítulos 5 e 6.

No que diz respeito aos cenários de operações turbinamento e bombagem em simultâneo, os dois modelos apresentam resultados similares. As velocidades máximas obtidas são muito semelhantes nos mesmos perfis e ocorrem no mesmo local. Os fenómenos de recirculação mais importantes são obtidos em ambos os modelos e representados de igual modo, ainda que existam alguns casos particulares descritos no Capítulo 6.

Quanto à análise das operações de turbinamento em Venda Nova II e bombagem em Venda Nova III, os cenários com resultados mais gravosos resultam de operações ao  $N_{men}=(260.56)$  e correspondem a velocidades de escoamento elevadas junto à margem direita entre as restituições quando Venda Nova III tem dois grupos a bombar ( $160 \text{ m}^3/\text{s}$ ), com 1 ( $25 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ou 2 grupos ( $50 \text{ m}^3/\text{s}$ ) em Venda Nova II, sendo o último cenário ligeiramente mais gravoso. Para o caso de haver 2 grupos a bombar em Venda Nova II, obtém-se velocidades de  $1.36 \text{ m/s}$  nas imediações da margem direita do rio Rabagão; Para os restantes cenários relativos a este tipo de operações, a configuração do escoamento é semelhante às dos cenários indicados neste parágrafo, mas as velocidades obtidas são menores.

Para os cenários em que Venda Nova III está a turbinar e Venda Nova II a bombar, as situações mais gravosas ocorrem para o  $N_{men}$ , na zona em frente à restituição de Venda Nova II, para o cenário com turbinamento de 2 grupos em Venda Nova III ( $200 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e bombagem de 1 ( $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ou 2 ( $40 \text{ m}^3/\text{s}$ ) grupos em Venda Nova II. Estas situações correspondem a campos de velocidades complexos na restituição de Venda Nova II. Para os restantes cenários relativos a este tipo de operações a configuração do escoamento é similar, mas as velocidades obtidas são menores.

Em termos puramente hidrodinâmicos no canal de restituição, para todos os cenários relativos a operações turbinamento e bombagem em simultâneo, as situações detetadas que possam implicar restrições de exploração correspondem, de uma forma genérica, aos níveis de exploração inferiores.

As operações ao nível da superfície livre à cota (265.00), permitem uma redução significativa das velocidades junto às margens em relação às operações ao  $N_{men}=(260.56)$ .

A análise às simulações com transporte de sedimentos permite concluir que o módulo incluído no IBER, apesar de ser uma simplificação de processos complexos, representa relativamente bem o que se verificou nos ensaios em modelo reduzido, sendo obtidos resultados e conclusões semelhantes.

Quanto aos resultados obtidos, salienta-se que as simulações efetuadas correspondem a uma configuração inicial dos fundos considerada a mais gravosa, e que a deposição de sedimentos diminui a secção livre para o escoamento, provocando velocidades superiores, principalmente nos cenários em que o nível da superfície livre é inferior.

Verifica-se que, para os cenários em que há bombagem de 2 grupos em Venda Nova III ( $160 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e turbinamento de 1 ( $25 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ou 2 ( $50 \text{ m}^3/\text{s}$ ) grupos em Venda Nova II, ao  $N_{men}$ , ocorre entrada de sedimentos para o interior da tomada de água em bombagem de Venda Nova III a partir do instante em que a cota superior da camada de sedimentos atinge uma altura próxima da cota da crista do lábio da estrutura. Quando são dois os grupos a turbinar em Venda Nova II a entrada de sedimentos ocorre ligeiramente mais cedo.

Nas simulações à cota da superfície livre (265.00), além da diminuição das velocidades em relação às simulações ao  $N_{men}=(260.56)$ , verifica-se um transporte de sedimentos reduzido ou nulo.

Para os cenários em que apenas um grupo de Venda Nova III se encontra a bombear ( $80 \text{ m}^3/\text{s}$ ), embora não tenham sido simulados, não é esperada a entrada de sedimentos para o interior da estrutura de restituição porque no cenário de calibração com o mesmo caudal em Venda Nova III, com Venda Nova II sem funcionamento, ao Nmen, não se observa entrada de sedimentos. É espetável a mesma conclusão quando Venda Nova II estiver em funcionamento, porque o transporte de sedimentos para o primeiro caso era quase nulo.

Para os cenários com bombagem em Venda Nova II e turbinamento em Venda Nova III, para o Nmen, há acumulação de sedimentos junto à restituição de Venda Nova II, mas sem entrada de sedimentos para o interior da referida estrutura. O funcionamento de 2 grupos em bombagem em Venda Nova II é ligeiramente mais gravoso que o funcionamento de apenas 1 grupo. Para estes cenários poderá existir transporte por suspensão, mas tal não foi simulado com o modelo disponível.

Como conclusão final é confirmada uma boa representação do escoamento por parte os dois modelos utilizados para os diferentes cenários testados, representando bem os campos de velocidades incluindo a deteção de zonas de recirculação e a sua influência no restante escoamento. Naturalmente, tratando-se de modelos, são representações simplificadas da realidade, os seus resultados devem ser alvo de análises críticas tendo em conta as simplificações dos modelos e algumas das limitações deste programa referidas no presente trabalho.

Conclui-se também que o módulo de transporte sólido por arrastamento presente no IBER poderá ser utilizado para estudos simples e iniciais com o intuito de obter uma base de conhecimento para estudos mais aprofundados.

Como sugestões à exploração dos aproveitamentos para manobras de turbinamento e bombagem em simultâneo definem-se os seguintes procedimentos:

- Sugere-se a monitorização da cota do leito do canal artificializado após uma grande cheia, fazendo remoção de material sempre que se verifiquem cotas do leito do canal muito próximas da cota da crista (257.00) do lábio da estrutura de restituição em turbinamento em Venda Nova III, confirmando a prescrição do relatório dos ensaios em modelo reduzido;
- Tendo-se verificado que para níveis superiores à cota (265.00) não ocorre entrada de sedimentos, durante as operações de turbinamento em Venda Nova II e bombagem em Venda Nova III, sugere-se que este seja o nível mínimo para operações deste género;
- Deve ser verificado, com observações ao local, se as recirculações que ocorrem na restituição de Venda Nova II quando este se encontra em modo de bombagem potenciam a vorticidade e a entrada de ar;
- Sugere-se, também, que o funcionamento em bombagem logo após uma cheia apenas deverá ocorrer após uma inspeção ao fundo do leito na zona em frente às duas tomadas de água em bombagem;
- Os resultados obtidos para os cenários em que há bombagem ou turbinamento de 2 grupos em Venda Nova III são independentes do funcionamento de 1 ou 2 grupos em Venda Nova II;
- Monitorização da margem direita do canal na extensão do canal entre as duas estruturas de restituição durante e após operações de turbinamento em Venda Nova II e bombagem em Venda Nova III. A monitorização visual deve ser efetuada quando a albufeira de Salamonde se encontre abaixo do Nmen para abranger uma maior área.

## **7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Como desenvolvimentos futuros a este trabalho, propõe-se a elaboração do estudo dos escoamentos transitórios para situações dinâmicas, mais concretamente o estudo do escoamento durante as manobras de paragem ou iniciação do funcionamento dos grupos dos aproveitamentos e estudos com variação do nível da albufeira.

No que diz respeito ao estudo de transporte de sedimentos define-se a necessidade de testar o módulo de transporte de sedimentos em suspensão do programa computacional IBER, que não foi aplicado neste estudo e que se considera importante a calibração de tal módulo.

Tendo presente a necessidade de flexibilizar as operações de turbinamento e bombagem nos aproveitamentos hidroelétricos, estudos semelhantes podem ser desenvolvidos para outros aproveitamentos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbot, M. B. (1979) *Computational Hydraulics Elements of the Theory of Free Surface Flows*. Pitman Publishing Ltd., London.
- Aldridge, B. N., Garrett, J. M. (1973). *Roughness coefficients for stream channels in Arizona* Tucson.
- Anderson, W. K. (1994) *A grid generation and flow solution method for the Euler equations on unstructured grids*. Journal of Computational Physics. 110(1), 23–38.
- Antunes do Carmo, J. S. (2004) *Modelação em Hidráulica Fluvial e Ambiente*. Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Artelia (2013a). *Renforcement De La Puissance De L'exploitation Hydro - Électrique De Venda Nova (Venda Nova III) Modèle De L'ouvrage De Restitution Et Du Canal Aval Rapport D'essais Phase 1: Hydraulique*. Grenoble.
- Artelia (2013b). *Renforcement De La Puissance De L'exploitation Hydro - Électrique De Venda Nova (Venda Nova III) Modèle De L'ouvrage De Restitution Et Du Canal Aval Rapport D'essais Phase 2: Sédimentologie*. Grenoble.
- Barry, J. J., Goodwin, P. (2007) *Bed Load Transport In Gravel-Bed Rivers*. Dissertation. University of Ohio.
- Berzins, M., Ware, J. M. (1995). *Positive cell-centered finite volume discretization methods for hyperbolic equations on irregular meshes*. Applied Numerical Mathematics. 16(4), 417–438. Leeds.
- Betâmio de Almeida, A., Koelle, E. (1992). Free surface transient flows. In *Fluid transients in pipe networks*, 431–483, Computational Mechanics Publications, Southampton.
- Chow, V. Te (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Company INC. New York.
- Chung, T. J. (1978). *Finite Element Analysis in FLuid Dynamics*. McGraw-Hill Inc., New York.
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E. (1989). *Concepts and applications of finite element analysis*. Joh Wiley & Sons INC.
- Cunge, J. A., Holly, F. M., Verwey, A. (1980). *Practical aspects of computational river hydraulics*. Pitman Publishers Ltd., London.
- Dawson, C., Mirabito, C. M. (2008). *The Shallow Water Equations (SWE)*. [users.ices.utexas.edu/~arbogast/cam397/dawson\\_v2.pdf](http://users.ices.utexas.edu/~arbogast/cam397/dawson_v2.pdf). Austin.
- EDP (2009) *Estratégia*. [http://www.edp.pt/pt/sustentabilidade/ambiente/alteracoesclimaticas/estrategia/Pages/Alteracoes\\_Climaticas.aspx](http://www.edp.pt/pt/sustentabilidade/ambiente/alteracoesclimaticas/estrategia/Pages/Alteracoes_Climaticas.aspx). 20-1-2016.
- EDP (2010a). *Reforço de potência de Venda Nova*. [http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros\\_produtores/empreendimento.php?item\\_id=87](http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/empreendimento.php?item_id=87). 20-2-2016.
- EDP (2010b) *EDP contrata equipamentos para barragem de Ribeirão e reforço de Venda*. <http://www.a-nossa-energia.edp.pt/noticias/artigo.php?id=34>. 20-2-2016.
- EDP (2014). *Venda Nova III*. [http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros\\_produtores/fotos\\_videos.php?item\\_id=87&cp\\_type=&section\\_type=fotos\\_videos](http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/fotos_videos.php?item_id=87&cp_type=&section_type=fotos_videos). 5-4-2016.
- EDP (2016). *Venda Nova III, Informação Técnica*. [http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros\\_produtores/info\\_tecnica.php?item\\_id=87&cp\\_type=he&section\\_type=info\\_tecnica..](http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/info_tecnica.php?item_id=87&cp_type=he&section_type=info_tecnica..) 5-3-2016
- EDP Gestão da Produção de Energia S.A. (2008). *Venda Nova III – Reforço de Potência do Aproveitamento Hidroelétrico de Venda Nova – Definição da Solução para Projecto*.

- EDP Gestão da Produção de Energia S.A. (2009a). *Venda Nova III Reforço de Potência de Venda Nova Projecto Volume I-Memória Geral*.
- EDP Gestão da Produção de Energia S.A. (2009b). *Venda Nova III Reforço de Potência de Venda Nova Projecto Volume II - Obras Construção Civil*.
- EDP Gestão da Produção De energia S.A. (2009c). *Venda Nova III Reforço de Potência de Venda Nova Projecto Volume III – Equipamentos*.
- EDP Gestão da Produção de Energia S.A. (2009d). *Venda Nova III Reforço de Potência de Venda Nova Aditamento ao Projecto Volume II-Estudos Hidráulicos e de Dimensionamento Económico Parte 5 - Condições de Vazão a Jusante*.
- EDP Gestão da Produção de Energia S.A. (2009e). *Venda Nova III Reforço de Potência de Venda Nova Projecto Volume IV - Desenhos*.
- EDPSU (2016). *Origens da Eletricidade*.  
<http://www.edpsu.pt/pt/origemdaenergia/Pages/OrigensdaEnergia.aspx>. 5-3-2016.
- EESI (2015). *Fossil Fuels*. <http://www.eesi.org/topics/fossil-fuels/description>. 1-3-2016.
- EIA (2016). *Electricity in the United States*.  
[http://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=electricity\\_in\\_the\\_united\\_states](http://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=electricity_in_the_united_states). 2-3-2016.
- Einstein, H. A. (1941). *Formulas for the transportation of bed load*. ASCE, 133–149.
- ESA (2013). *Pumped Hydroelectric Storage*. <http://energystorage.org/energy-storage/technologies/pumped-hydroelectric-storage>. 15-3-2016.
- ESRI (2016). *What is a TIN?* <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/tin/tin-in-arcgis-pro.htm>. 16-3-2016.
- Fernandes, M. M. (2012). *Mecânica dos Solos Conceitos e Princípios Fundamentais*. Feup Edições, Porto.
- García-Navarro, P., Alcrudo, F. (1995). *Simulación de flujo transitorio en cauces naturales*. Ingeniería del agua. ,2(1), 1–18.
- GEAMA, FLUMEN, CEDEX (2014). *Hydraulic Reference Manual, IBER v1.0*. A Coruña.
- Gonçalves, N. D. F. (2007). *Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas*. Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências da Unversidade do Porto.
- GOOGLE INC (2004). *Google Earth Pro*.
- Ministério da Energia e Inovação (2007). *Uma política de energia com ambição*.
- Maia, R. (2015). *Reforços de Potência de Aproveitamentos Existentes*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Meyer-Peter, E., Müller, R. (1948). *Formulas for Bed-Load Transport*. [uuid:4fda9b61-be28-4703-ab06-43cdc2a21bd7](https://doi.org/10.2196/43cdc2a21bd7). Stockholm.
- Moges, E. (2010). *Evaluation of Sediment Transport Equations and Parameter Sensitivity Analysis Using the SRH-2D Model*. Master's Thesis. Universität Stuttgart.
- Murillo, J. et al.(2006). *Extension of an explicit finite volume method to large time steps (CFL>1): application to shallow water flows*. International Journal for Numerical Methods in Fluids. 50(1), 63–102. Wiley Interscience. Zaragoza.
- Murillo, J. et al (2008). *2D modelling of erosion / deposition processes with suspended load using upwind finite volumes*. Journal of Hydraulic Research, 46(1 (2008)), 99–112.

- Murillo, J., Brufau, P., Garcia-Navarro, P. (2007). *Aplicación del modelo bidimensional GUAD-2D para la determinación de zonas inundables en el T. M. de Fragua (Huesca)*. III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente.
- OCS (2016). *How Hydrodynamic Models Are Used*.  
[http://www.ojogo.pt/multimedia/fotografias.aspx?content\\_id=5142074](http://www.ojogo.pt/multimedia/fotografias.aspx?content_id=5142074). 20-4-2016.
- Olsen, N. R. B. (1999). *Two Dimensional Modeling of Reservoir Flushing Processes*. Journal of Hydraulic Research. ,Vol:37.
- Paolo, C. (2012). *Sediment transport models for Shallow Water equations*. Tesi di Master. Università Degli Studi di Pisa Facoltà di Ingegneria.
- REN (2016). *Diagrama de Produção Eólica*.  
<http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/InformacaoExploracao/Paginas/DiagramadeProdu%C3%A7%C3%A3oE%C3%B3lica.aspx>. 5-3-2016.
- REPÚBLICA PORTUGUESA (2007). *Decreto-Lei nº 178/2006*. Diário da república, 31 de Maio de 2007.3644(24)–3644(48).
- REPÚBLICA PORTUGUESA (2013). *Plano de Acção Nacional para as Energias Renováveis ao abrigo da directiva 2009/28/CE*. Resumo da Política Nacional de Energias Renováveis.
- RIBEIRO, V. *et al.* (2014). *Venda Nova III Repowering Project : Outlet and Downstream Channel Scale Model Studies*. , 3rd IAHR Europe Congress.
- SNIRH (2016). *Características das Albufeiras*.  
<http://snirh.pt/index.php?idMain=1&idItem=7&albufcode=.> 1-3-2016.
- Stone, M. (2016). *A Look at the Biggest Energy Storage Projects Built Around the World in the Last Year*. <http://www.greentechmedia.com/articles/read/a-look-at-the-biggest-energy-storage-projects-built-around-the-world-in-the>. 10-3-2016.
- Swamee, P. K., Chahar, B. R. (2015). *Design of Canals*. Springer India
- Taveira Pinto, F. (2013). *Hidráulica Geral 2: Escoamentos com Superfície Livre*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Teixeira Duarte Engenharia e Construções S.A. (1998) *Empreendimento de Venda Nova II Estudos sedimentologia sondagens e ensaios Relatório*.
- Toro, E. F. (2001). *Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester.
- Wong, M., Parker, G. (2006). *Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Müller Using Their Own Database*. Journal of Hydraulic Engineering., 1159–1168.
- Wu, W. *et al* (2005). *A depth-averaged two-dimensional model for flow, sediment transport, and bed topography in curved channels with riparian vegetation*. Water Resources Research. 41(3), 1–15.
- Wu, W. (2008). *Computational River Dynamics*. Taylor & Francis. London.
- Yu, C. (2013). *Two dimensional finite volume model for simulating unsteady turbulent flow and sediment transport*. University of Arizona Libraries. Tucson.
- Zhao, D. H. *et al* (1994). *Finite Volume Two\_Dimensional Unsteady-Flow Model for River Basins*. Journal of Hydraulic Engineering. Journal of Hydraulic Engineering. 120(7), 863–883.
- Zhou, J. G. *et al* (2001). *The Surface Gradient Method for the Treatment of Source Terms in the Shallow-Water Equations*. Journal of Computational Physics. 168, 1–25.



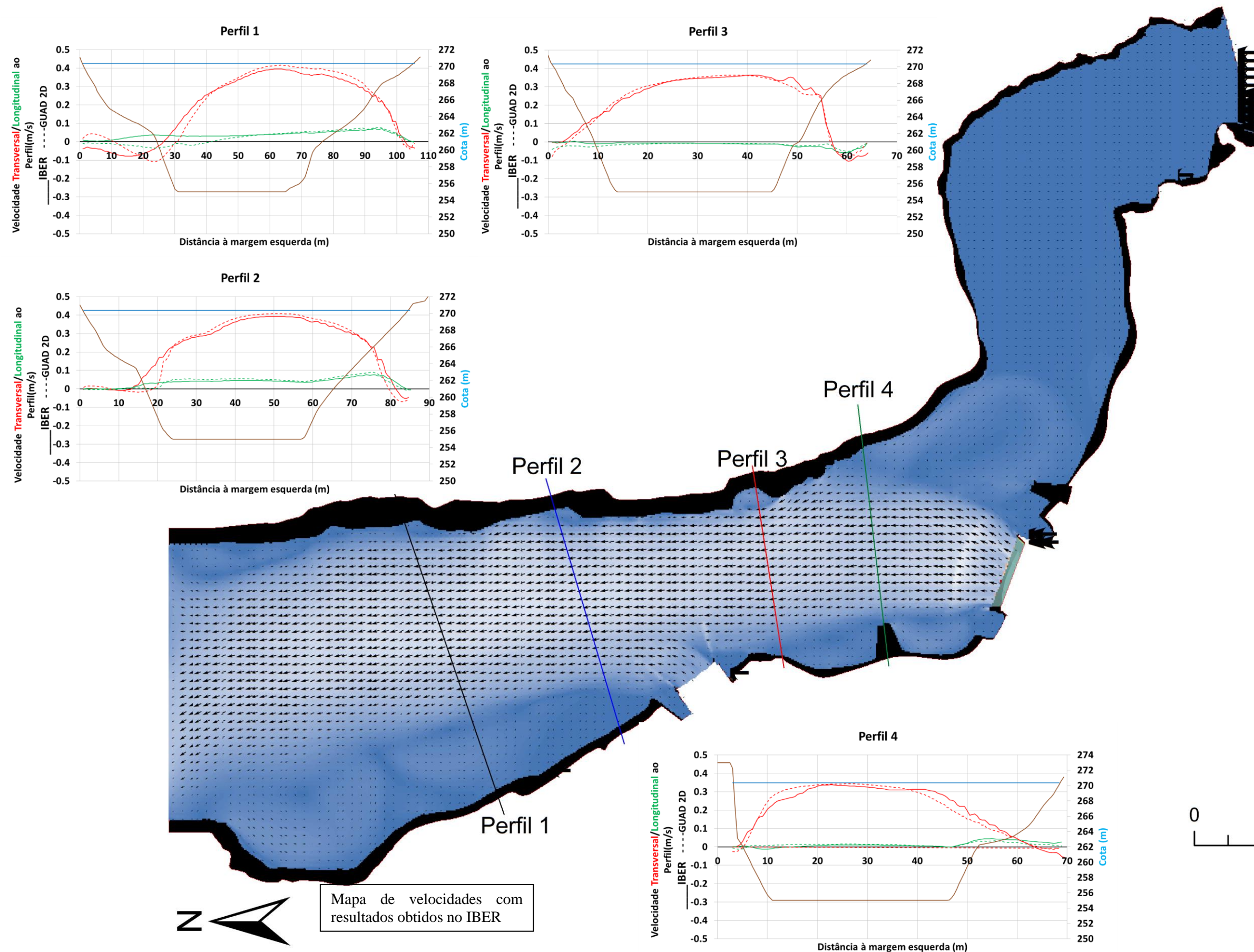
## APÊNDICE



**APÊNDICE A**  
**CENÁRIOS DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS**





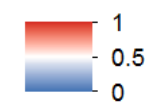


Erro na leitura da informação durante o processo de exportação de dados. Ocorre para resultados ao NPA.

## Apêndice A1

### Legenda

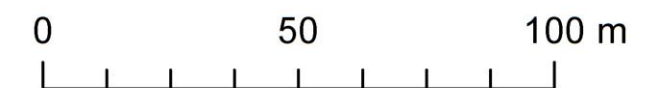
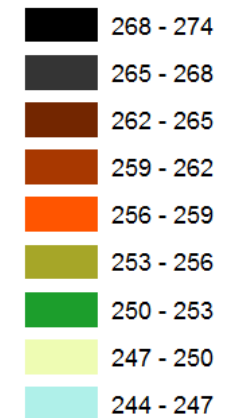
#### Velocidade (m/s)



#### Terreno

— Limite

#### Cota (m)

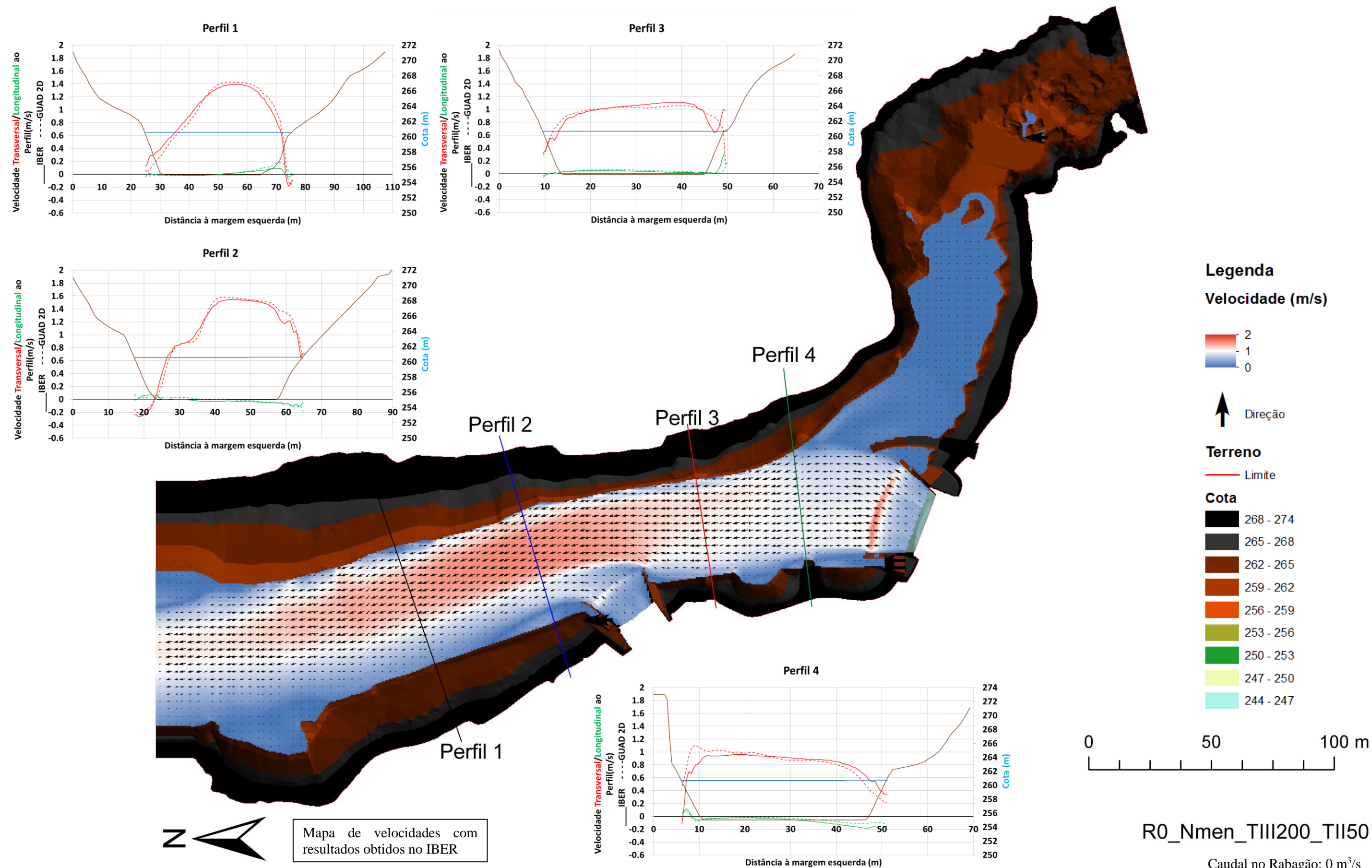


R0\_NPA\_TIII200\_TII50

Caudal no Rabagão: 0 m<sup>3</sup>/s  
 Nível da Albufeira: NPA=270.36 m  
 Turbinamento em VN III de 200 m<sup>3</sup>/s  
 Turbinamento em VN II de 50 m<sup>3</sup>/s





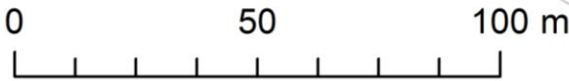
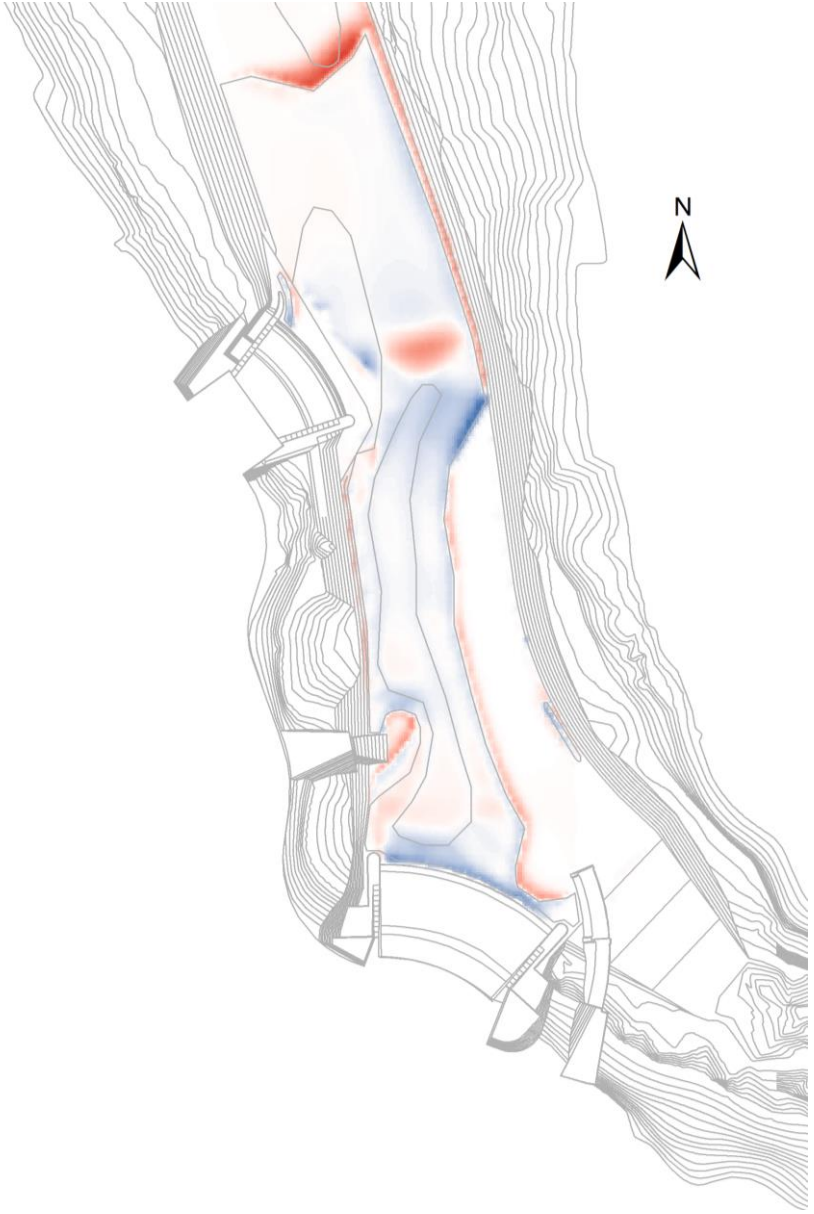
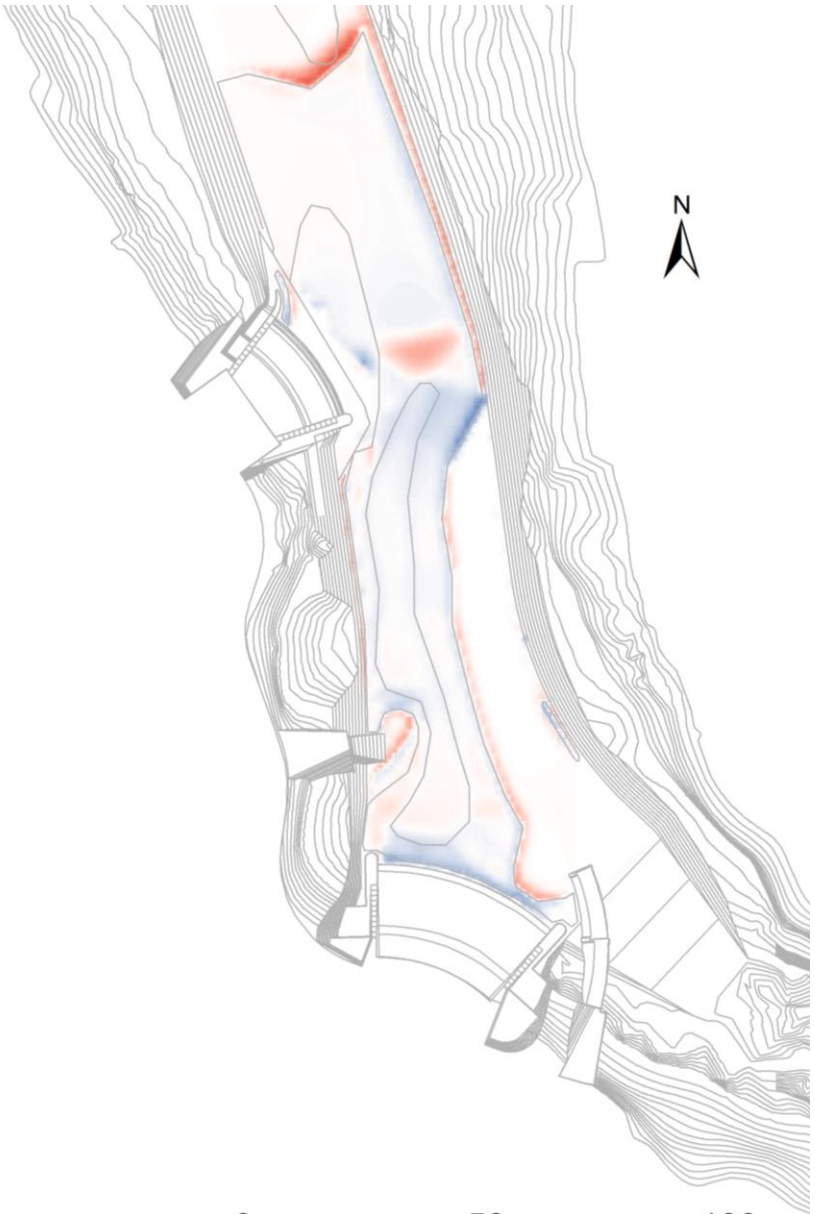


R0\_Nmen\_TIII200\_TII50

Caudal no Rabagão: 0 m<sup>3</sup>/s  
Nível da Albufeira: Nmen=260.56 m  
Turbinamento em VN III de 200 m<sup>3</sup>/s  
Turbinamento em VN II de 50 m<sup>3</sup>/s

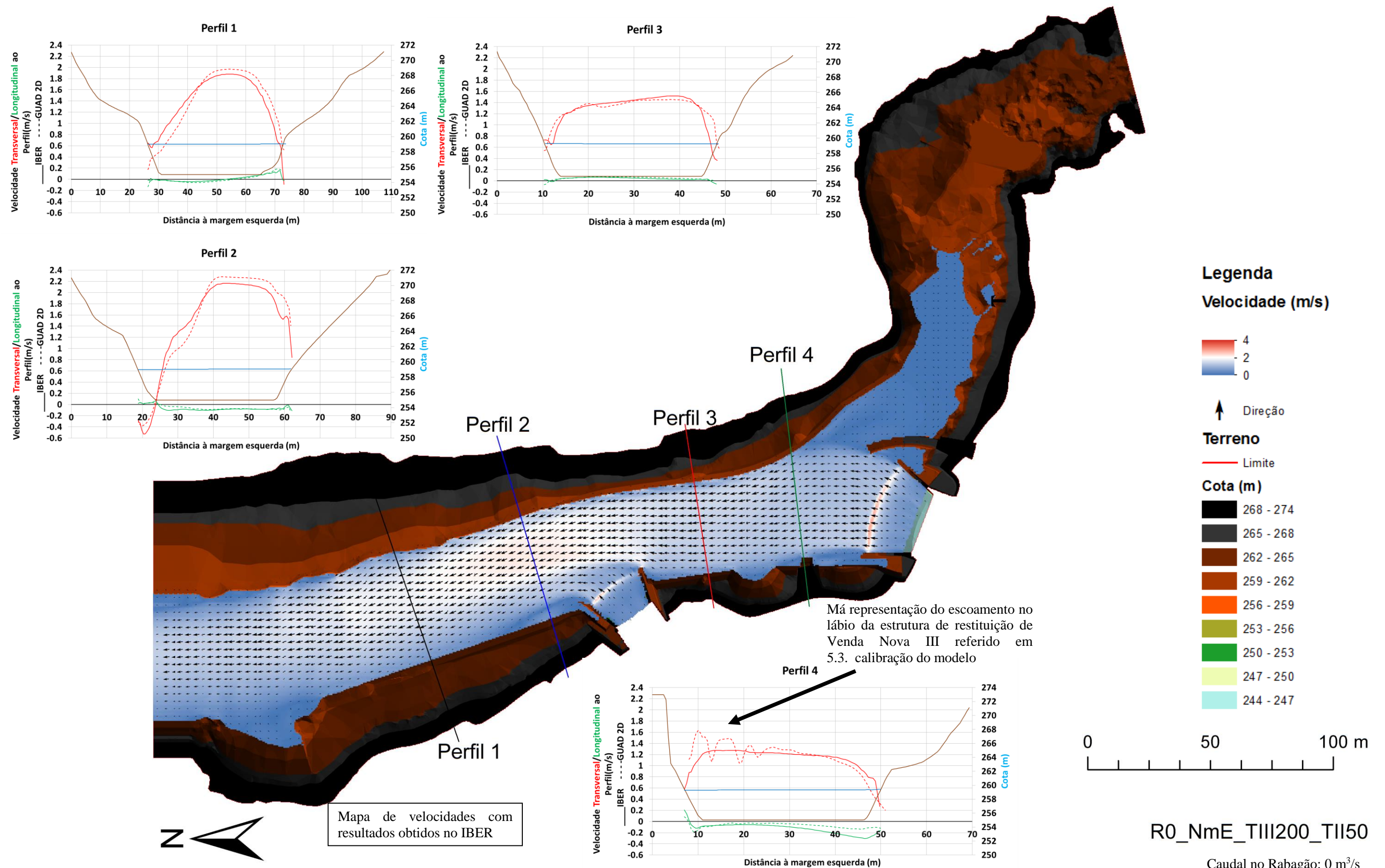
**Legenda**

**Erosão (m)**



Resultados relativos a transporte de sedimentos para o cenário anterior





Má representação do escoamento no lábio da estrutura de restituição de Venda Nova III referido em 5.3. calibração do modelo

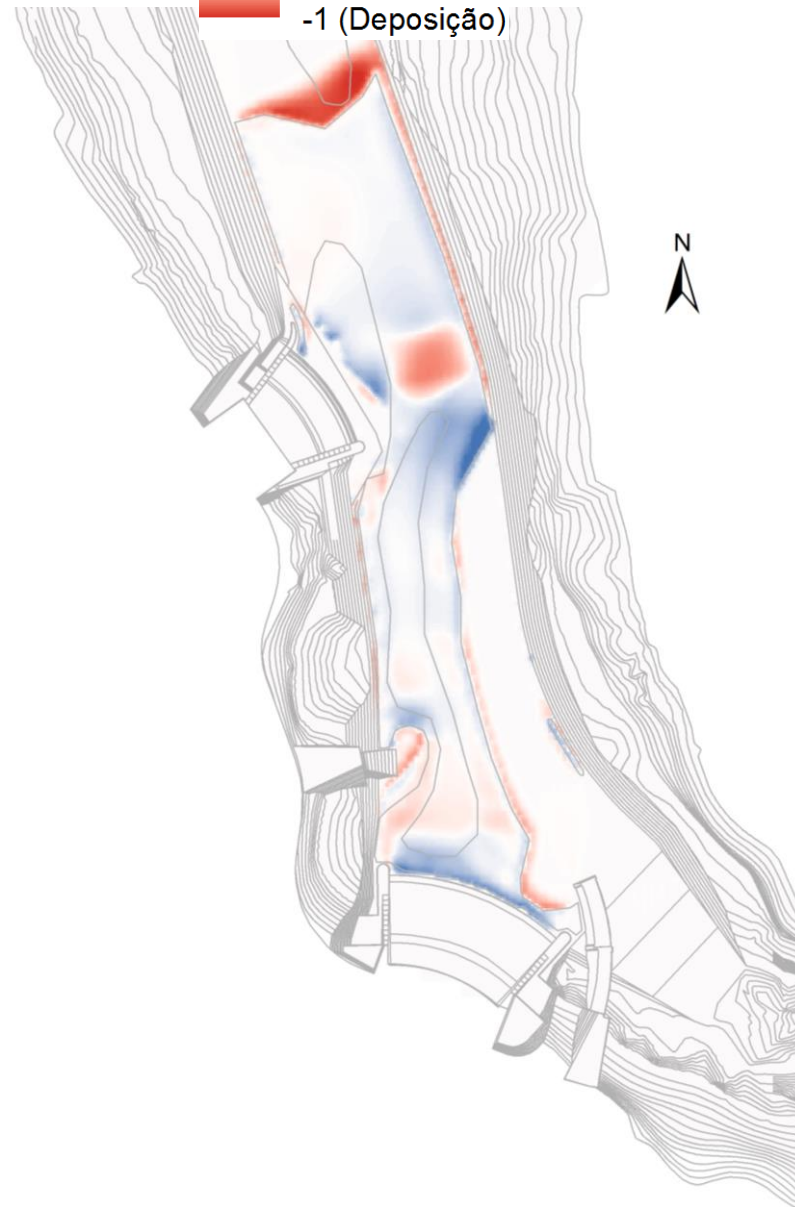
## Legenda

Erosão (m)

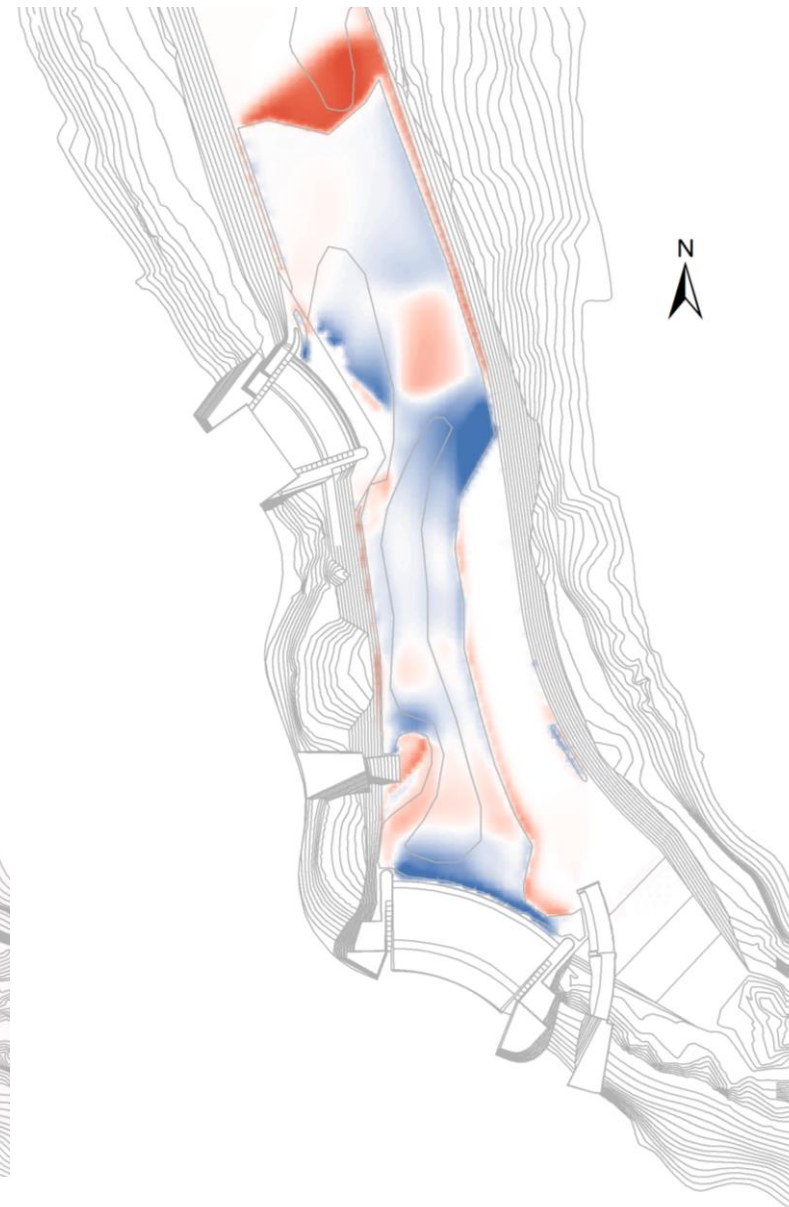
3h

1 (Erosão)

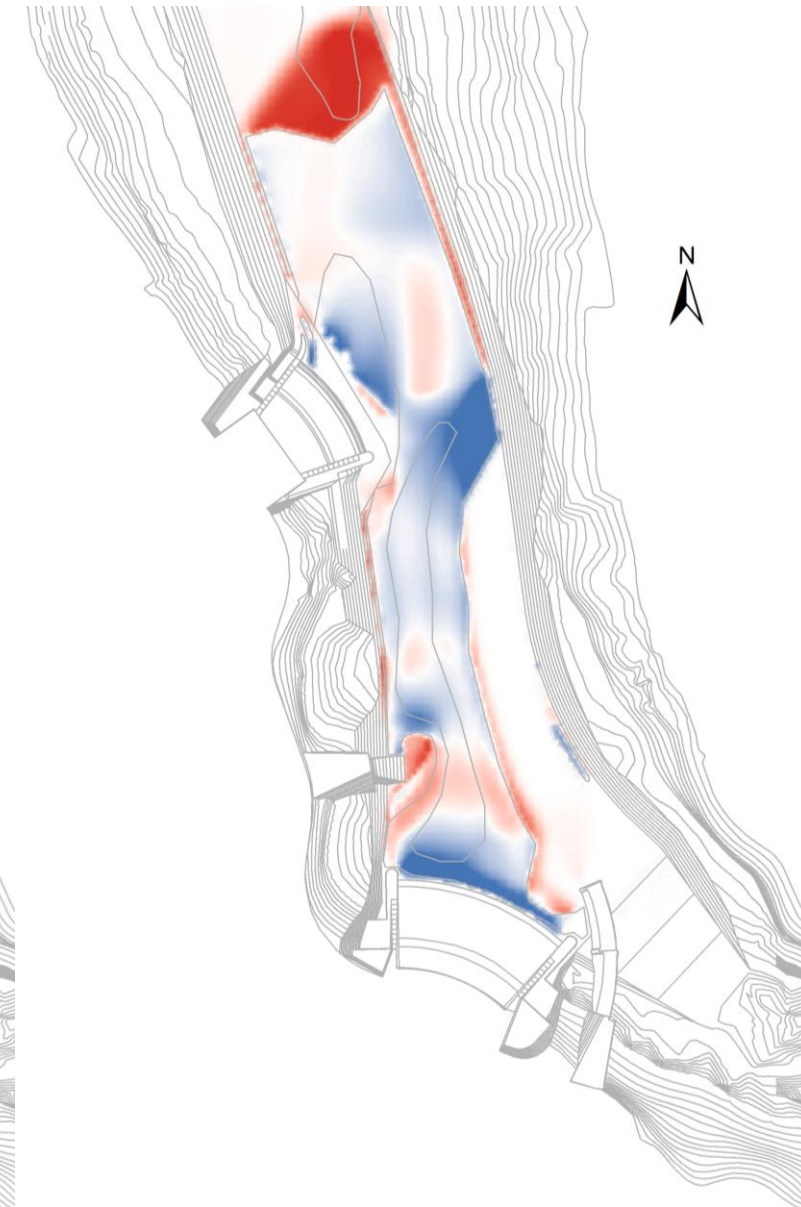
-1 (Deposição)



6h



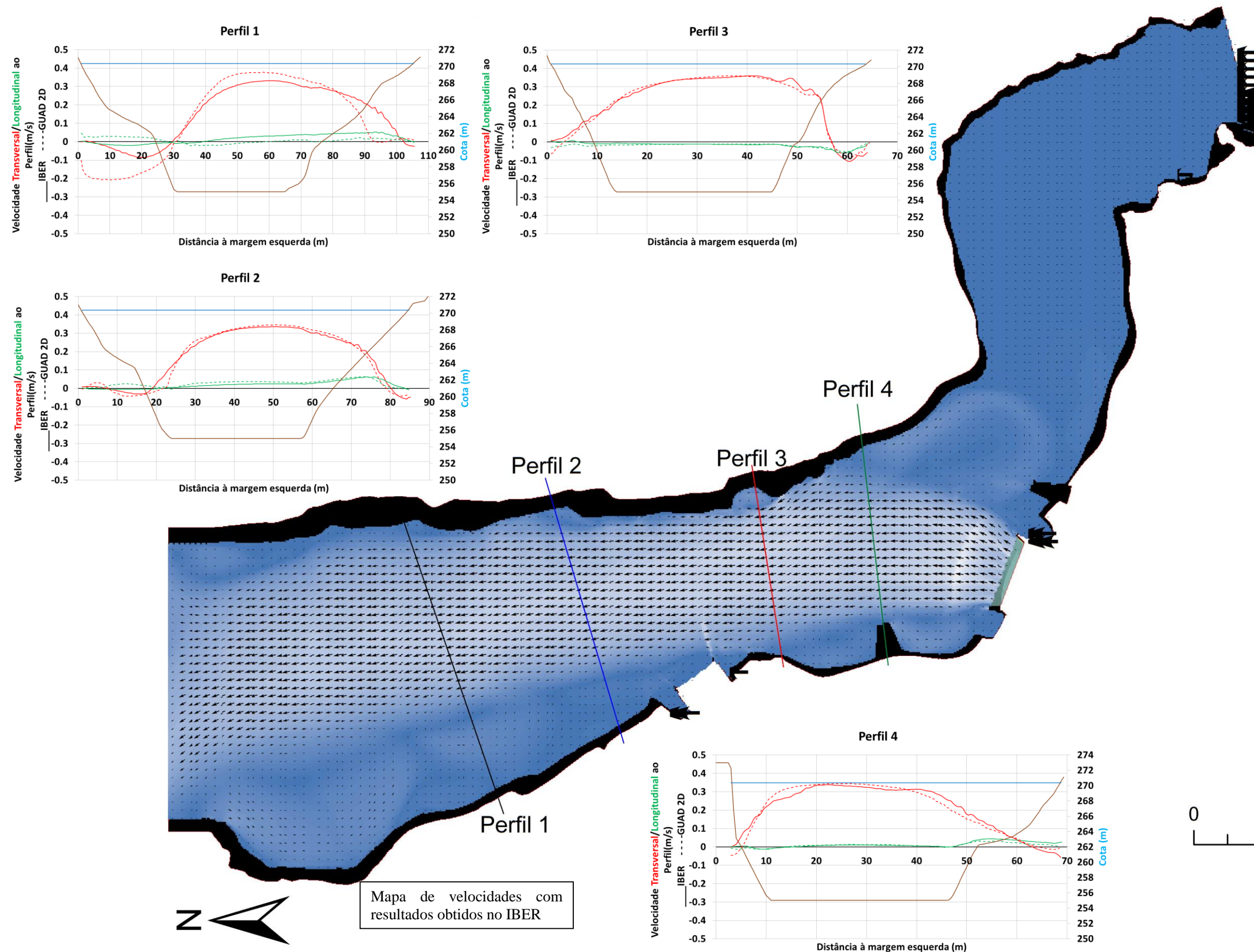
10h



0 50 100 m

Resultados relativos a transporte de sedimentos para o cenário R0\_NmE\_TIII200\_TII50

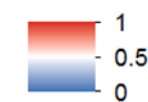




## Apêndice A2

### Legenda

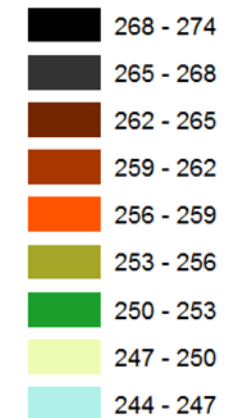
#### Velocidade (m/s)



#### Terreno

— Limite

#### Cota (m)

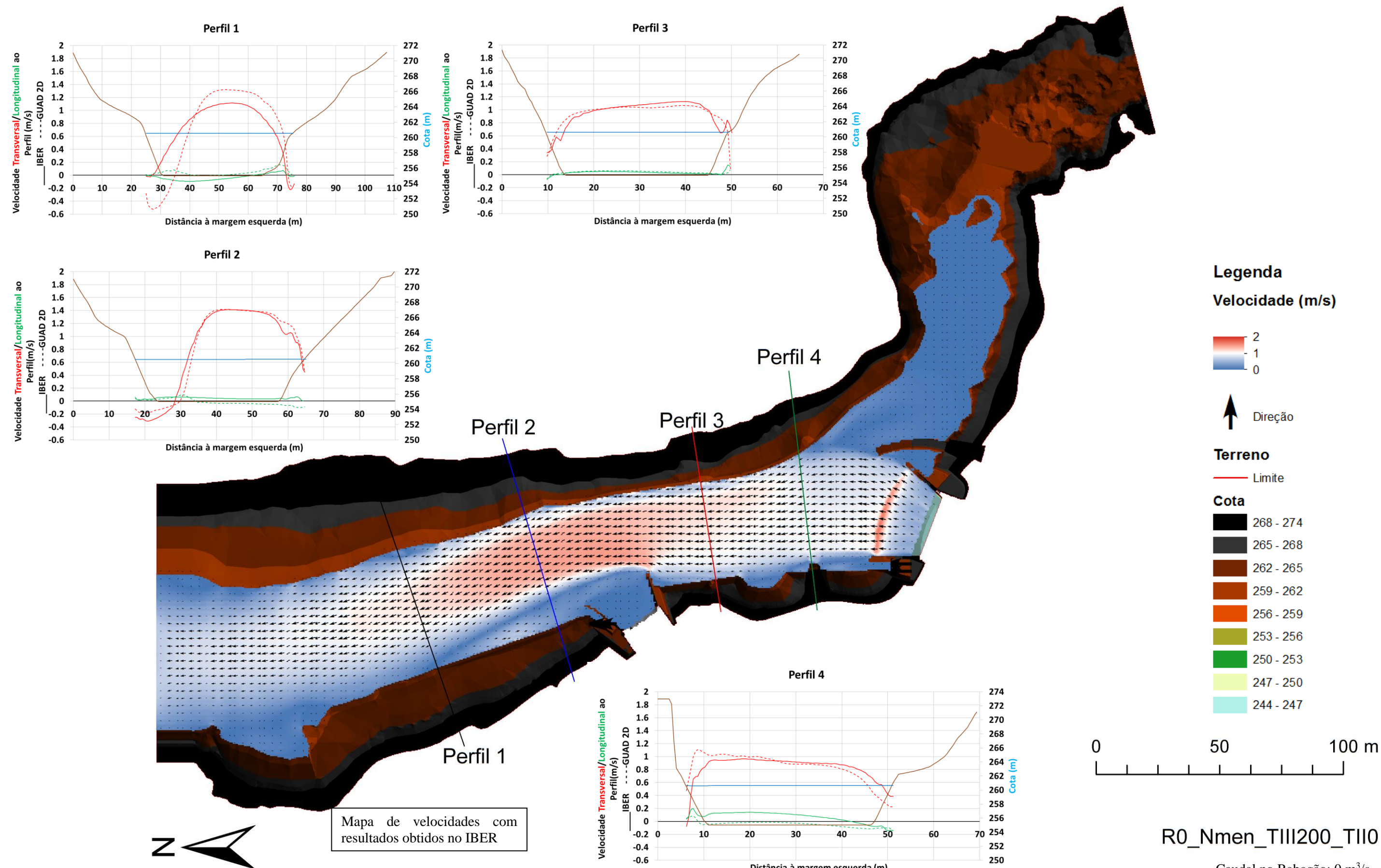


R0\_NPA\_TIII200\_TII0

Caudal no Rabagão: 0 m<sup>3</sup>/s  
Nível da Albufeira: NPA=270.36 m  
Turbinamento em VN III de 200 m<sup>3</sup>/s  
VN II sem funcionamento







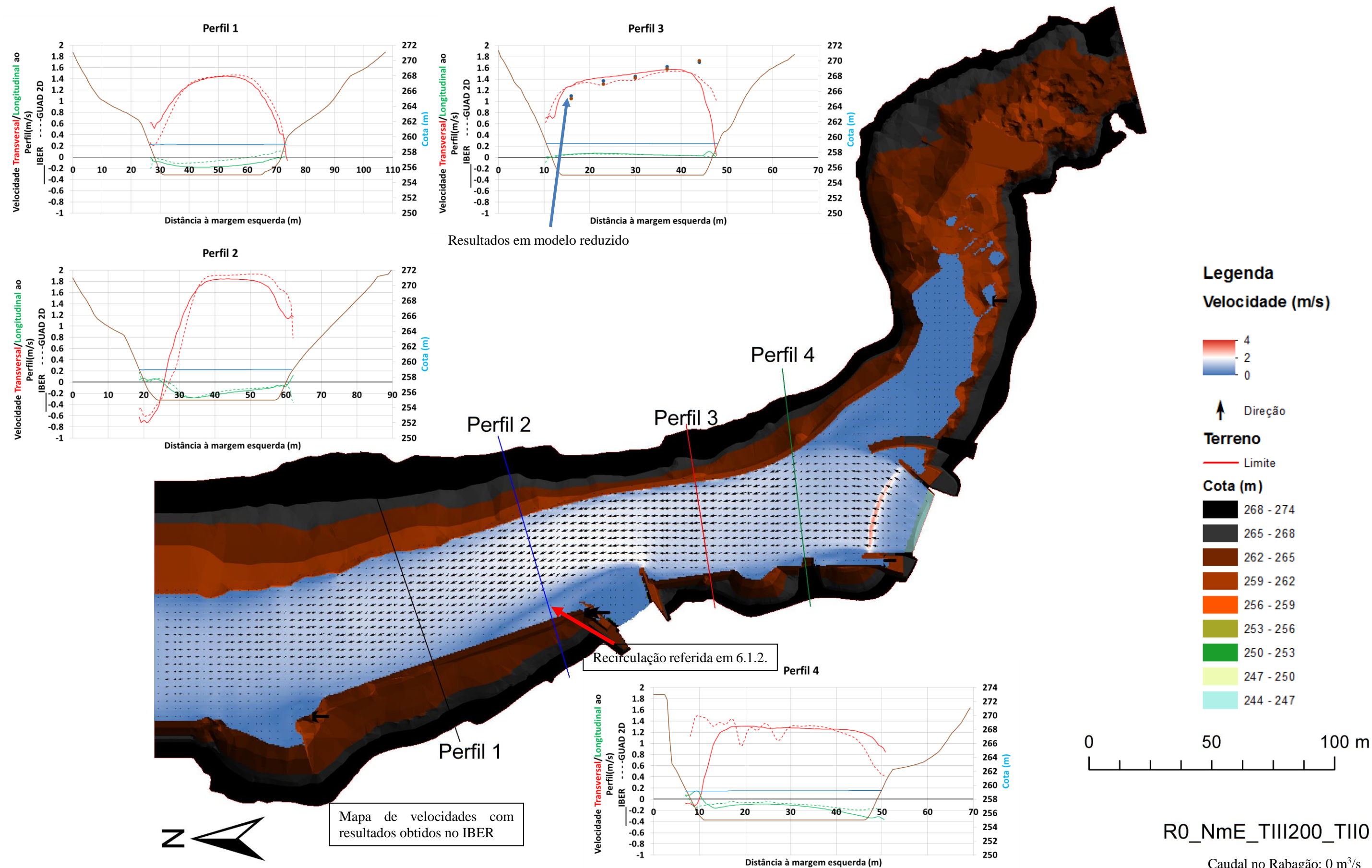
Mapa de velocidades com  
resultados obtidos no IBER

R0\_Nmen\_TIII200\_TII0

Caudal no Rabagão: 0 m³/s  
Nível da Albufeira: Nmen=260.56 m  
Turbinamento em VN III de 200 m³/s  
VN II sem funcionamento

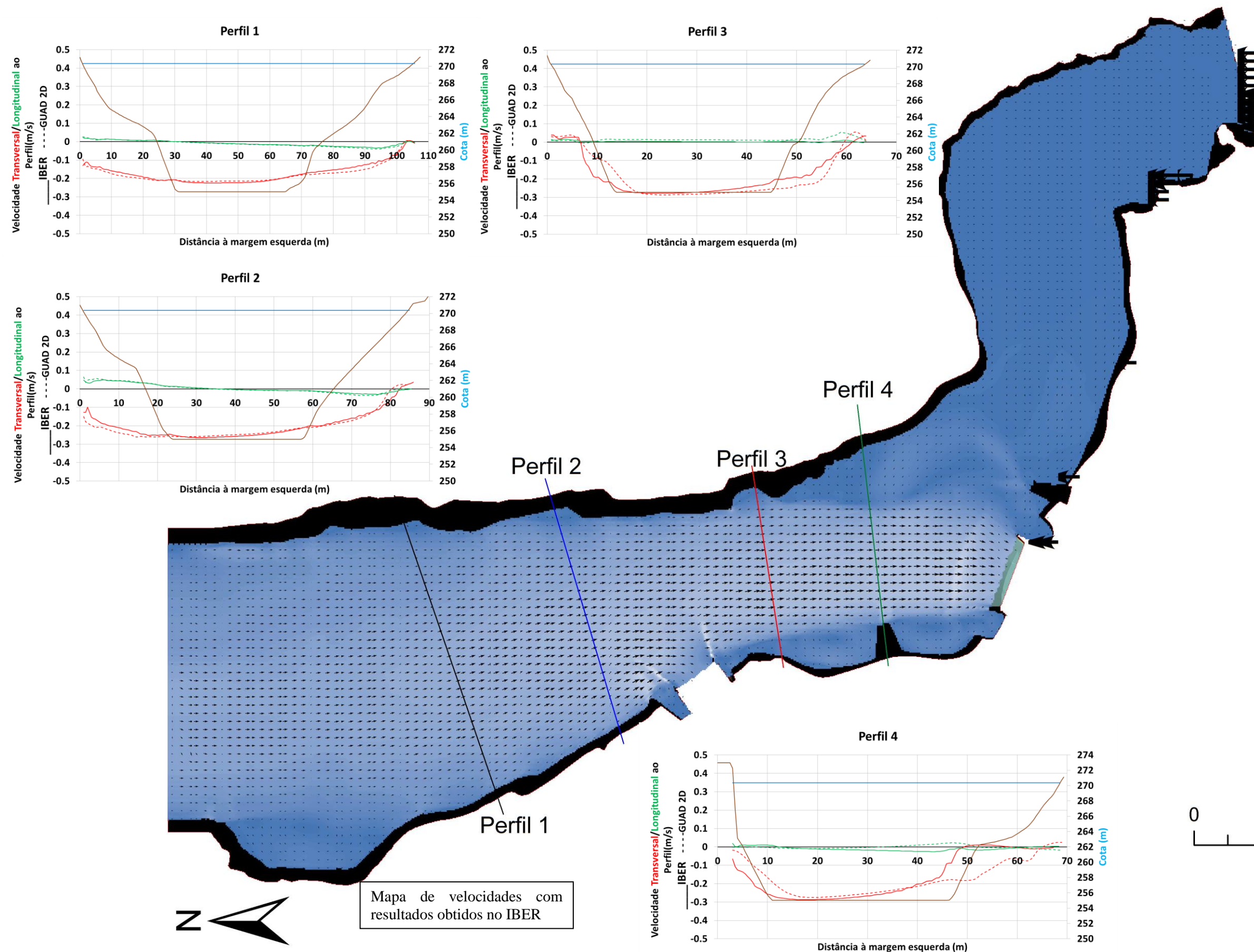








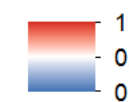




## Apêndice A3

### Legenda

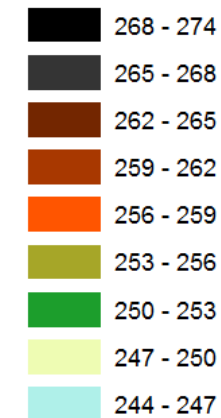
#### Velocidade (m/s)



#### Terreno

— Limite

#### Cota (m)

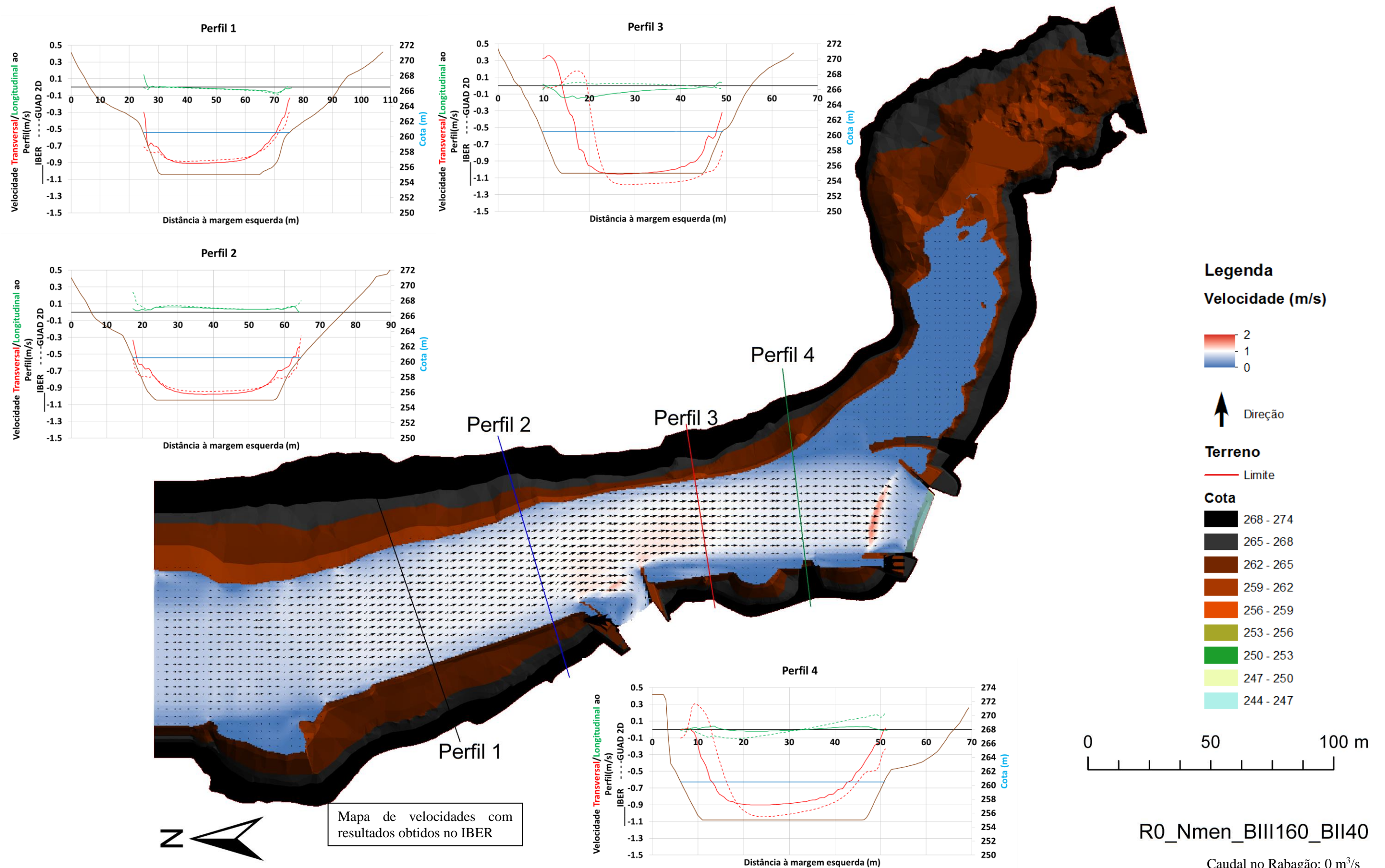


R0\_NPA\_BIII160\_BII40

Caudal no Rabagão: 0 m<sup>3</sup>/s  
Nível da Albufeira: NPA=270.36 m  
Bombagem em VN III de 160 m<sup>3</sup>/s  
Bombagem em VN II de 40 m<sup>3</sup>/s









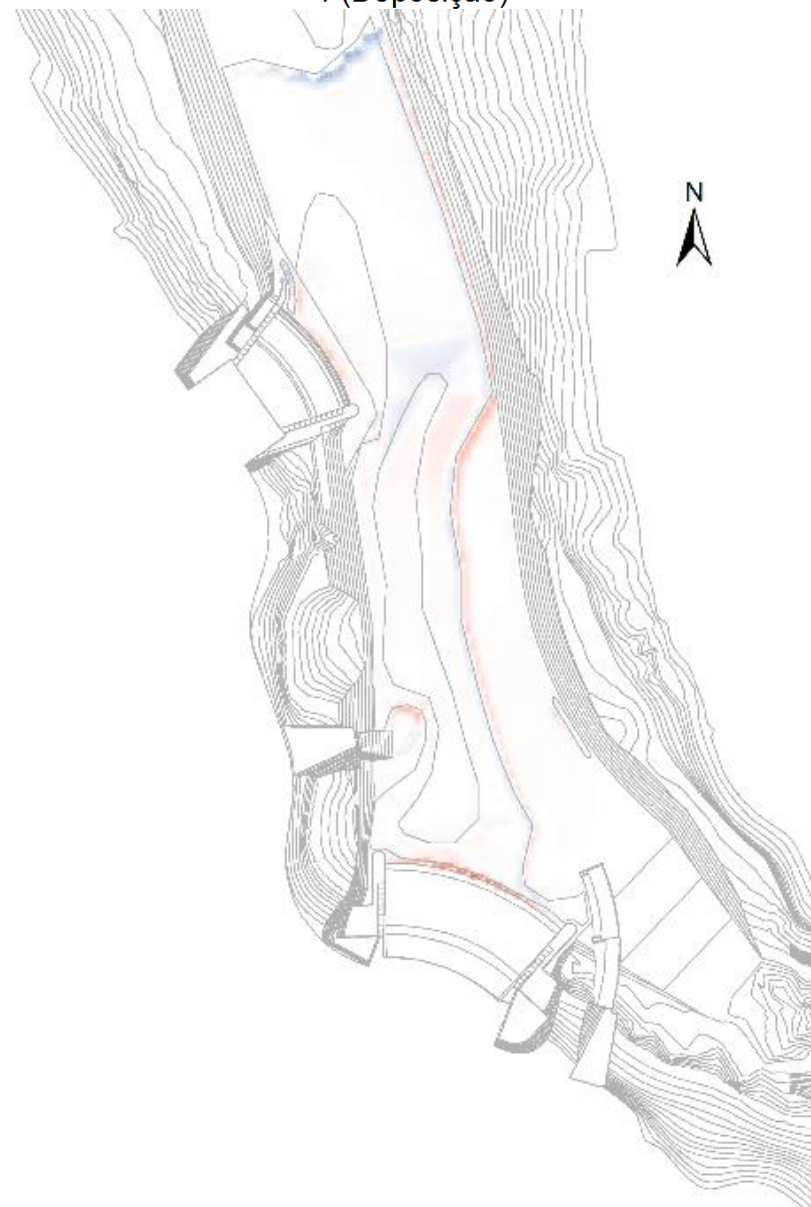
## Legenda

### Erosão (m)

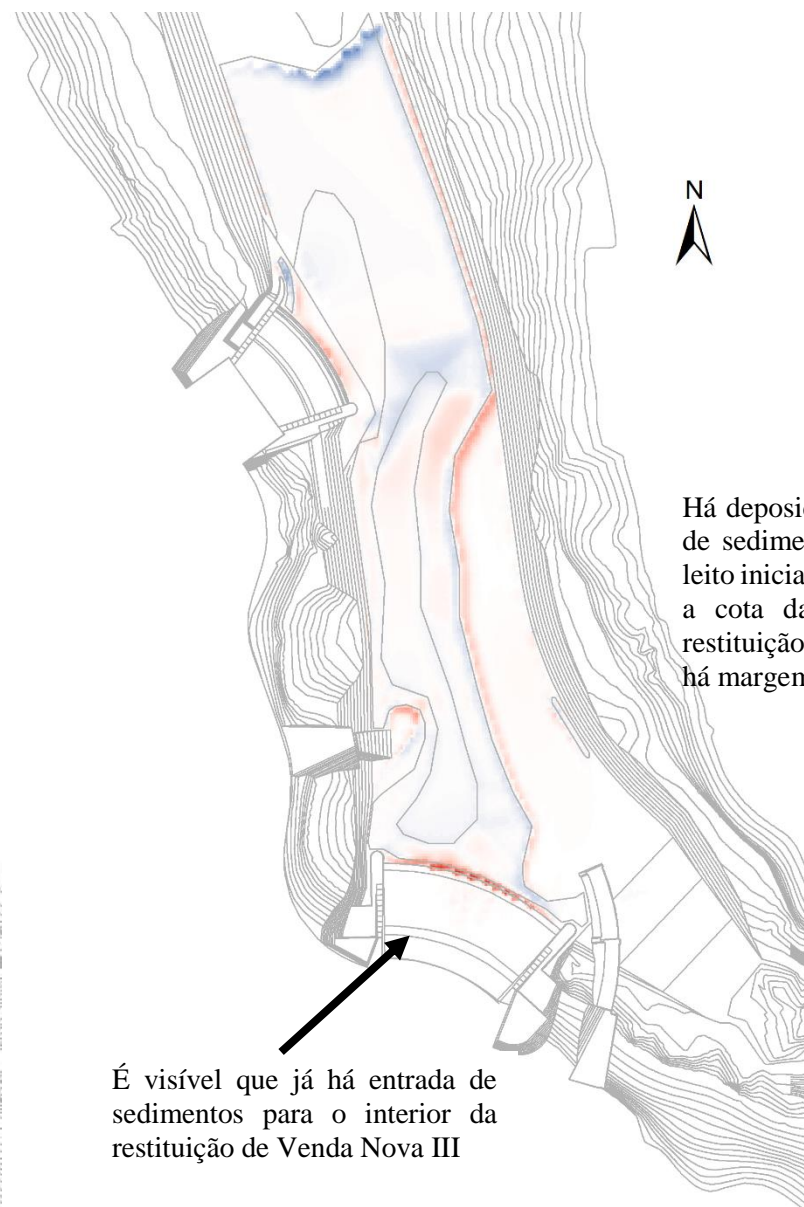
3h

1 (Erosão)

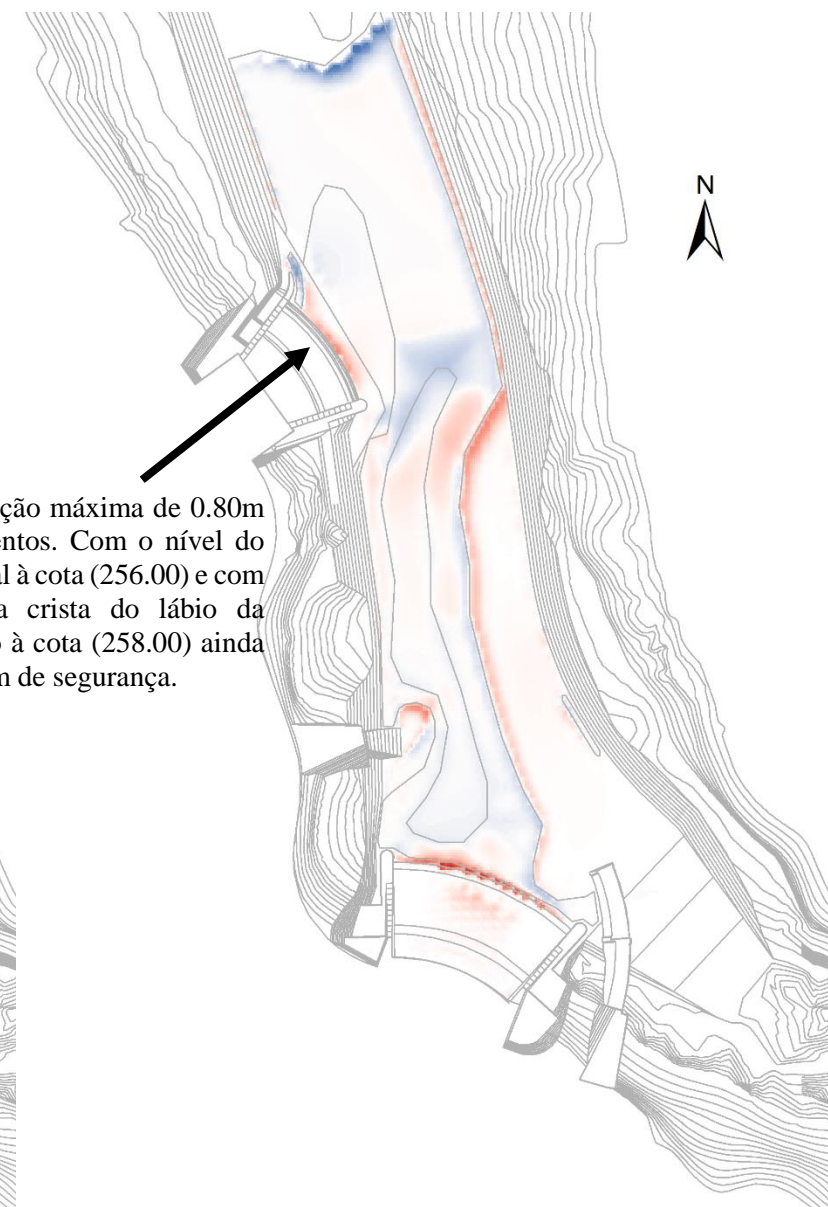
-1 (Deposição)



6h



10h



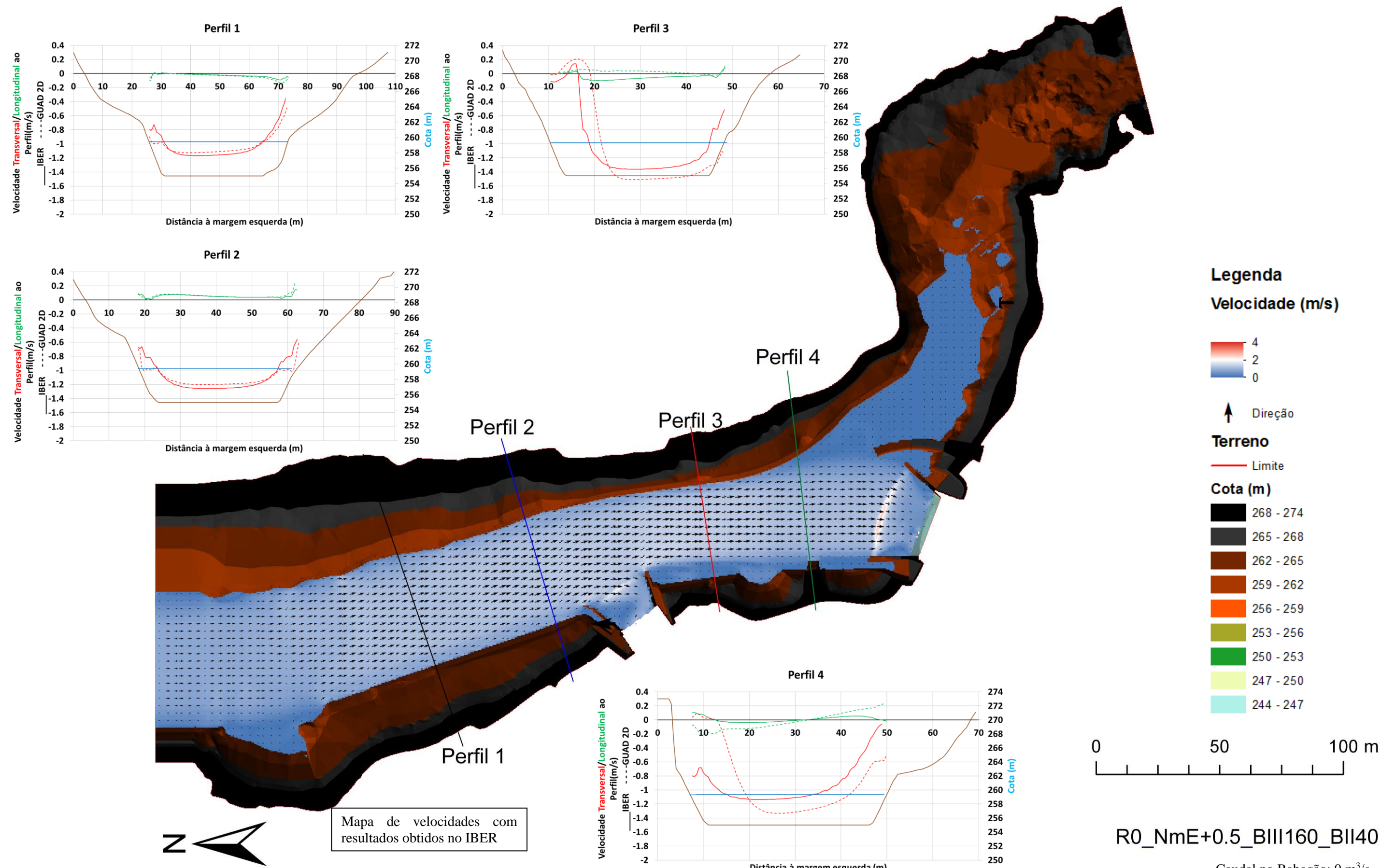
Há deposição máxima de 0.80m de sedimentos. Com o nível do leito inicial à cota (256.00) e com a cota da crista do lábio da restituição à cota (258.00) ainda há margem de segurança.

É visível que já há entrada de sedimentos para o interior da restituição de Venda Nova III

0 50 100 m

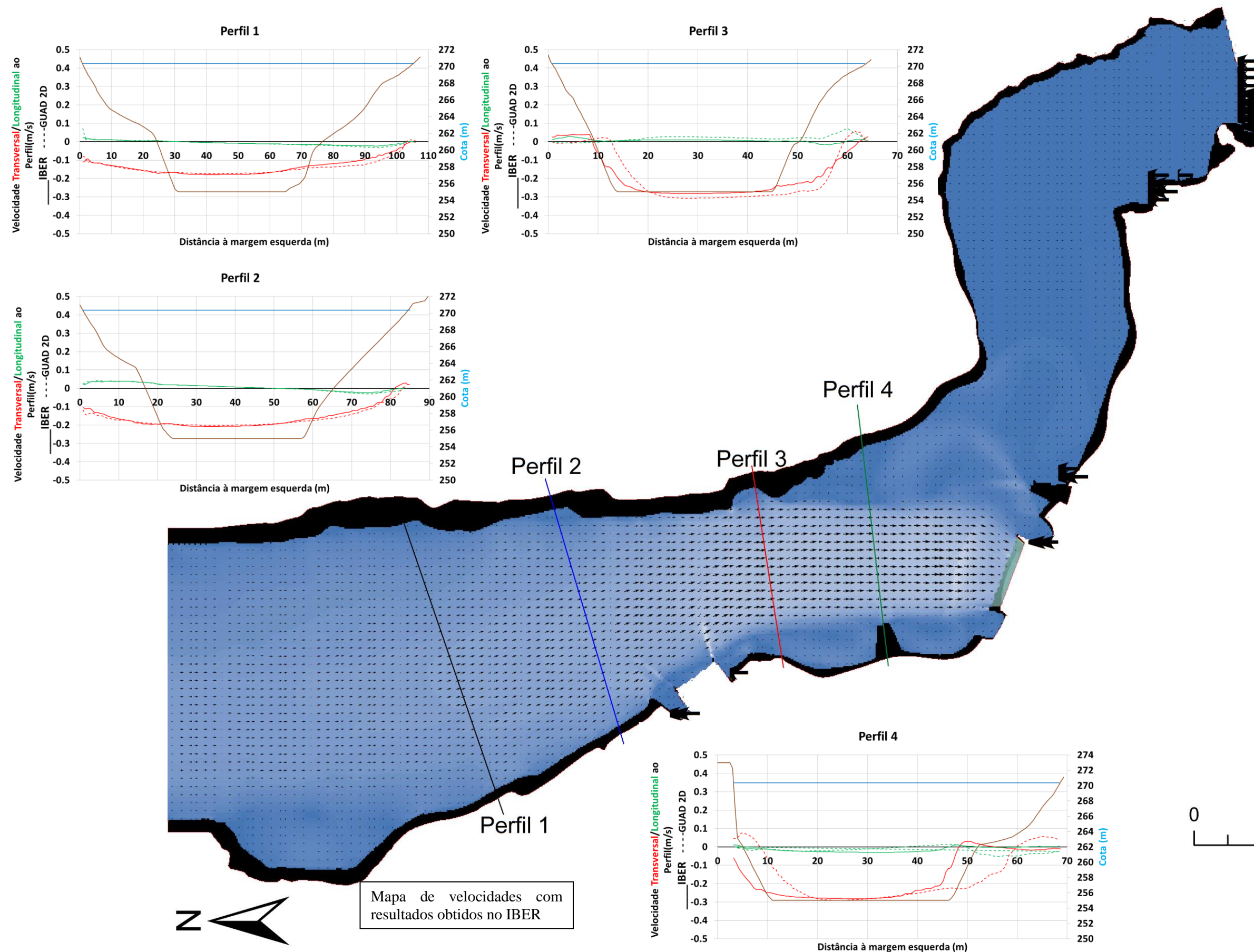
Resultados relativos a transporte de sedimentos para o cenário R0\_Nmen\_BIII160\_BII40







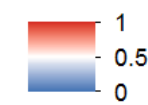




## Apêndice A4

### Legenda

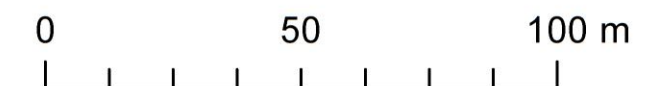
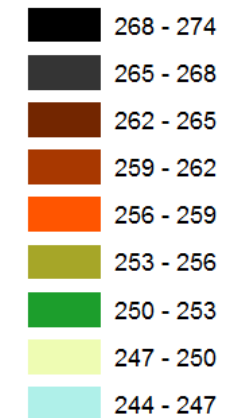
#### Velocidade (m/s)



#### Terreno

— Limite

#### Cota (m)

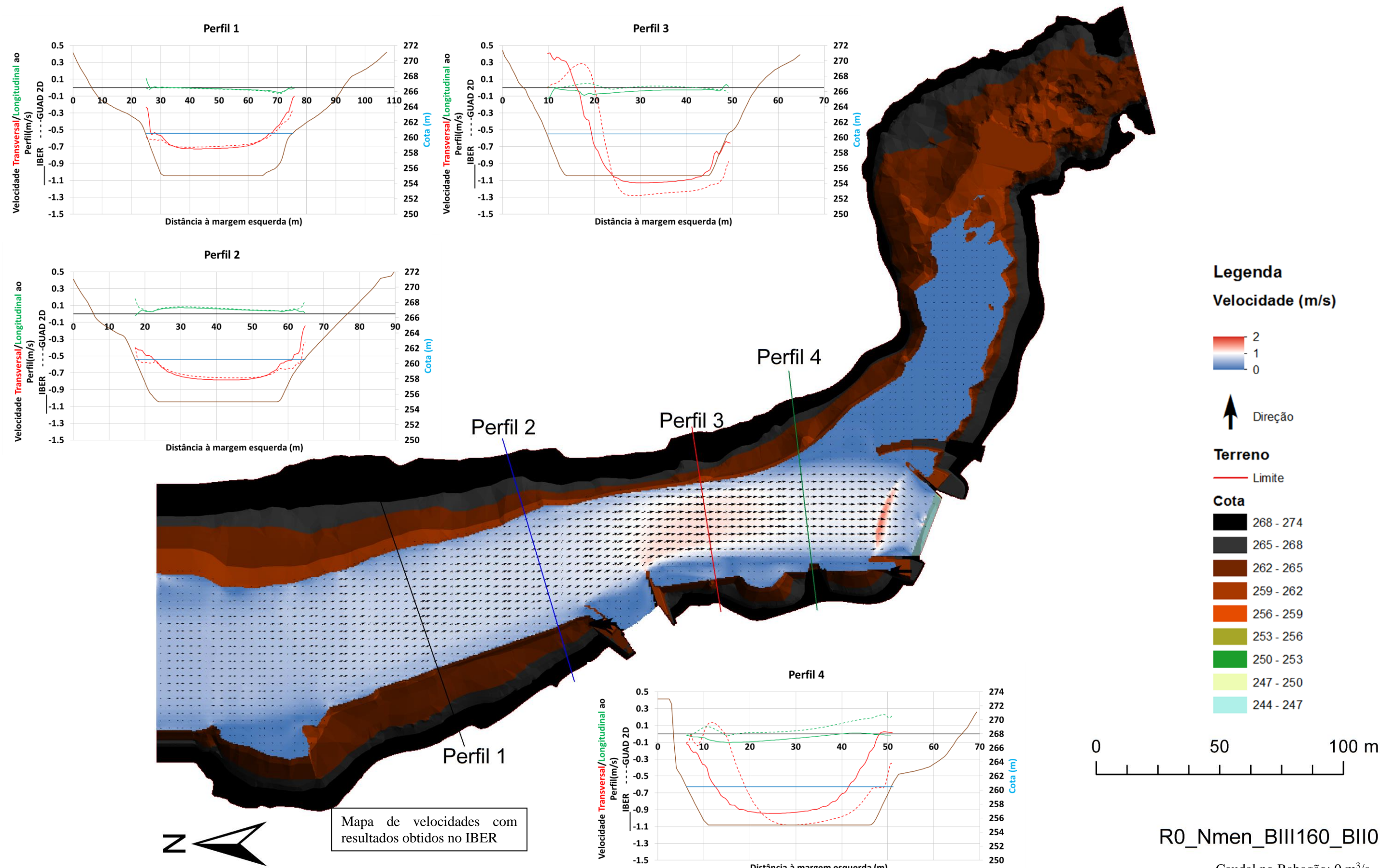


R0\_NPA\_BIII160\_BII0

Caudal no Rabagão: 0 m<sup>3</sup>/s  
Nível da Albufeira: NPA=270.36 m  
Bombagem em VN III de 160 m<sup>3</sup>/s  
VN II sem funcionamento







R0\_Nmen\_BIII160\_BII0

Caudal no Rabagão: 0 m³/s  
Nível da Albufeira: Nmen=260.56 m  
Bombagem em VN III de 160 m³/s  
VN II sem funcionamento

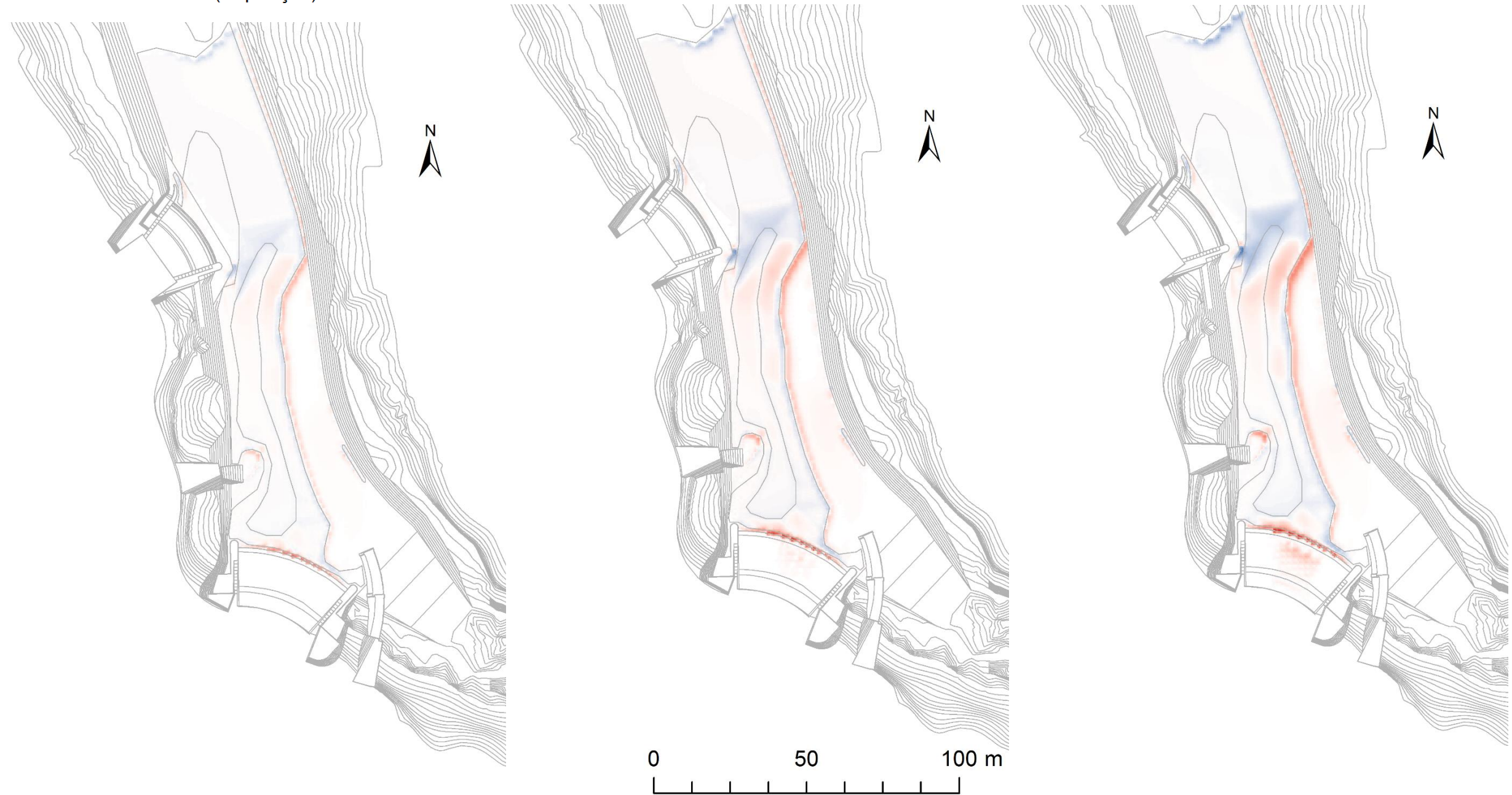
## Legenda

Erosão (m)

3h

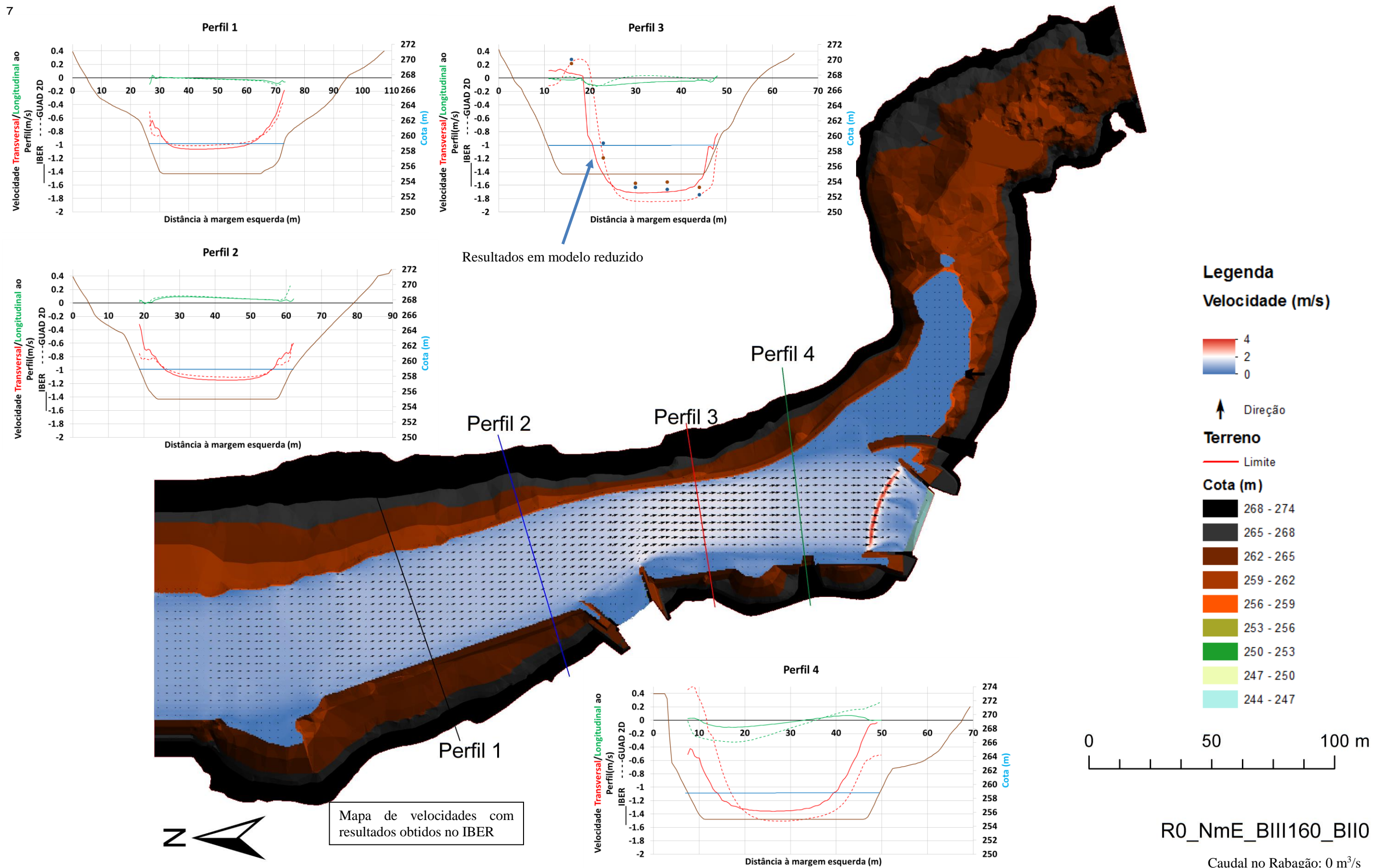
1 (Erosão)

-1 (Deposição)



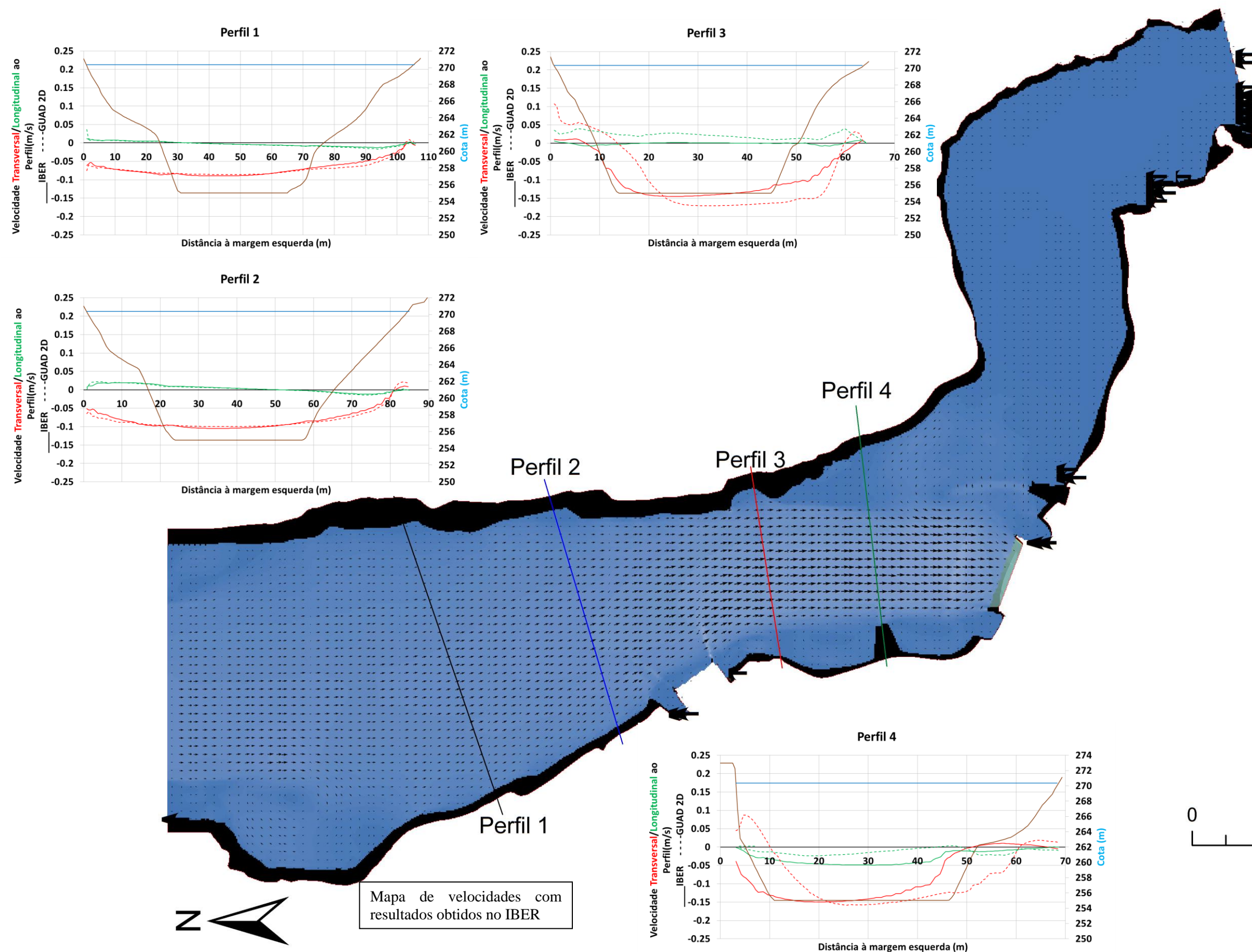
Resultados relativos a transporte de sedimentos para o cenário R0\_Nmen\_BIII160\_BII0











## Apêndice A5

### Legenda

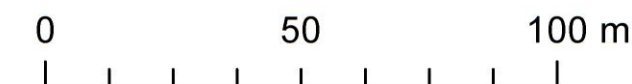
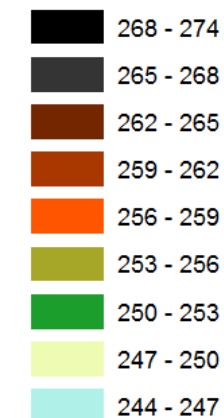
#### Velocidade (m/s)



#### Terreno

— Limite

#### Cota (m)

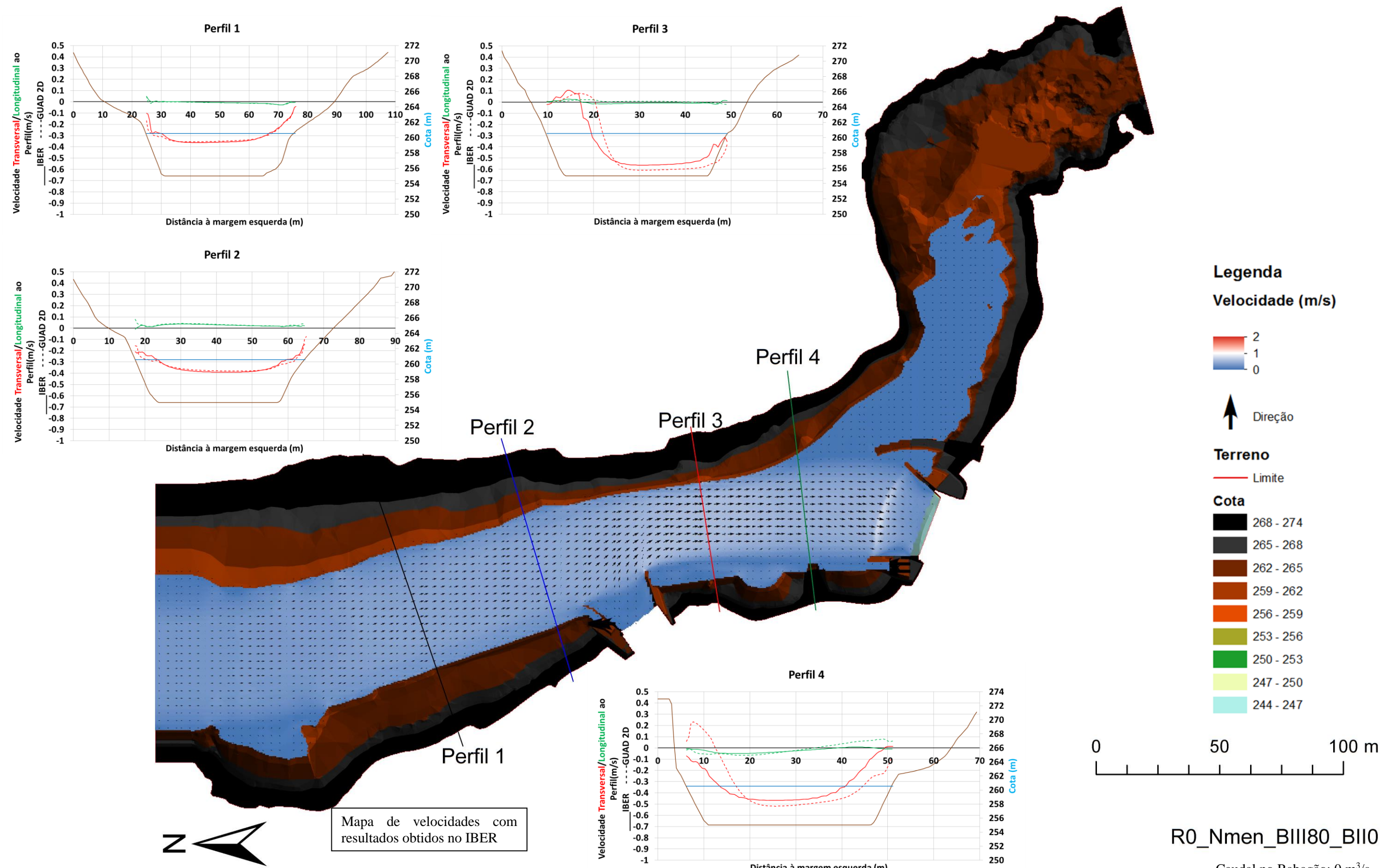


R0\_NPA\_BIII80\_BII0

Caudal no Rabagão: 0 m<sup>3</sup>/s  
Nível da Albufeira: NPA=270.36 m  
Bombagem em VN III de 80 m<sup>3</sup>/s  
VN II sem funcionamento



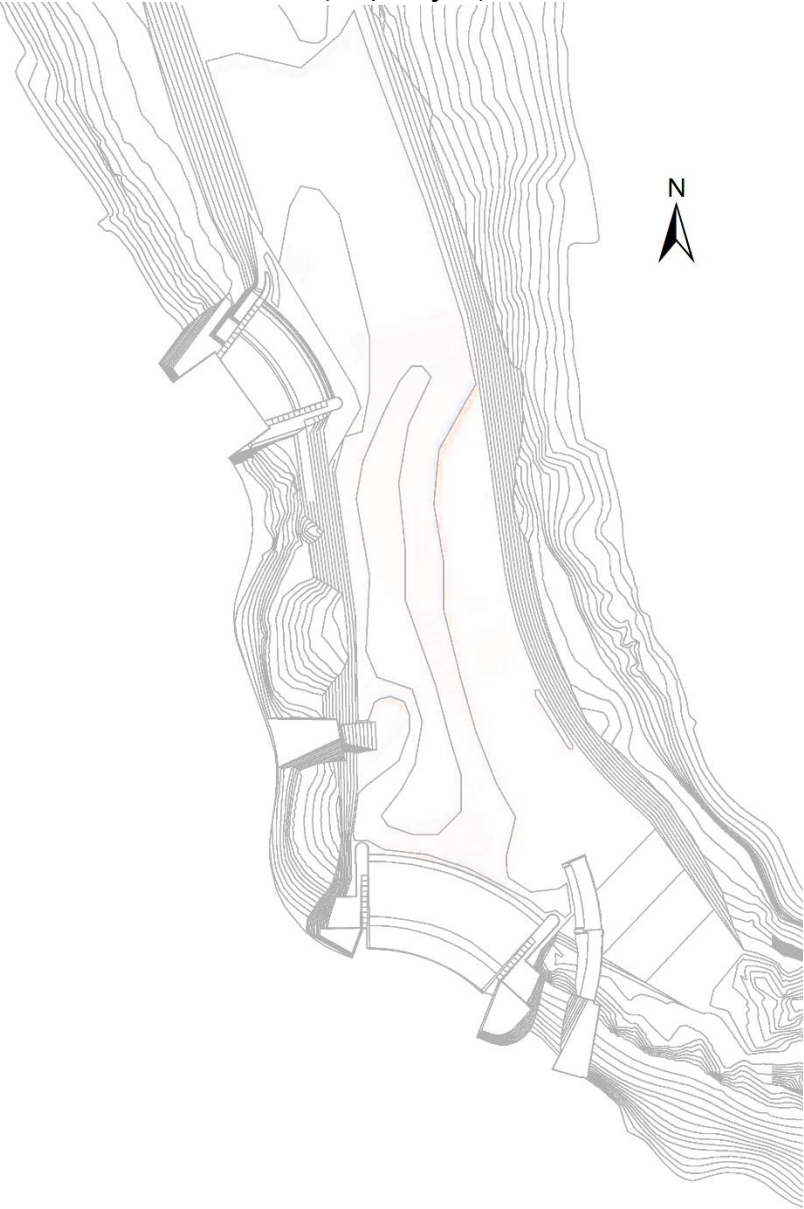




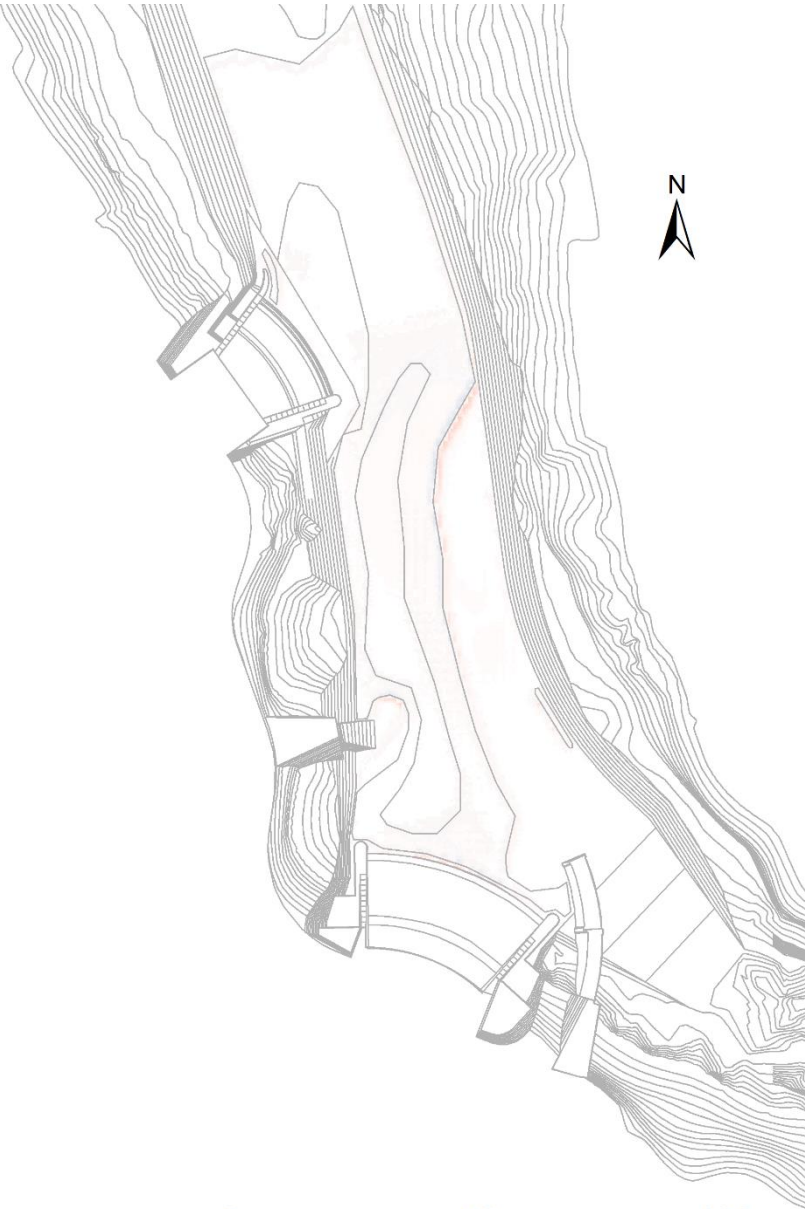
Mapa de velocidades com resultados obtidos no IBER

Legenda

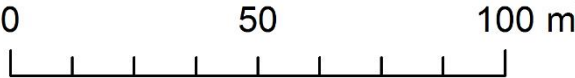
Erosão (m)



6h

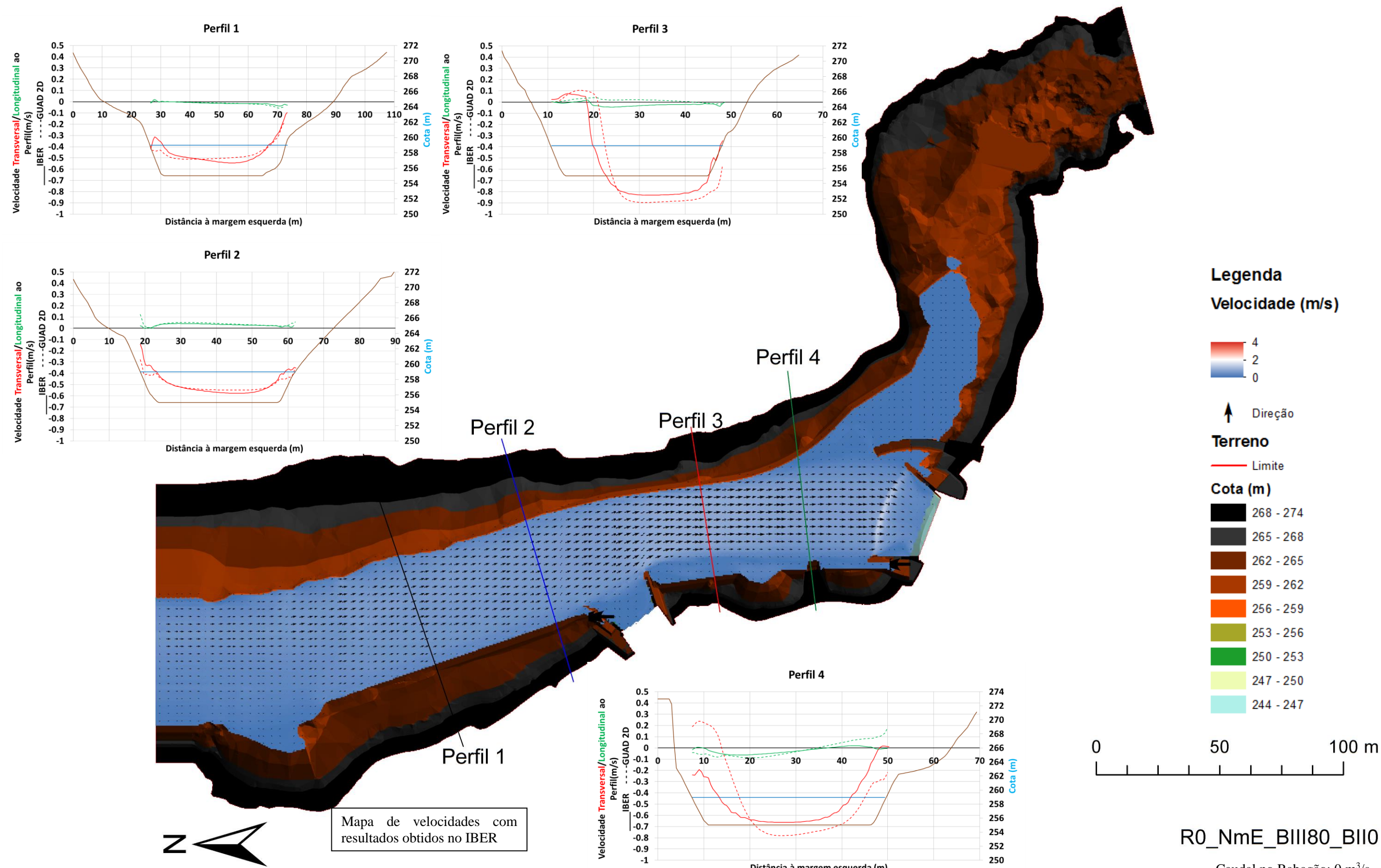


10h



Resultados relativos a transporte de sedimentos para o cenário R0\_Nmen\_BIII80\_BII0



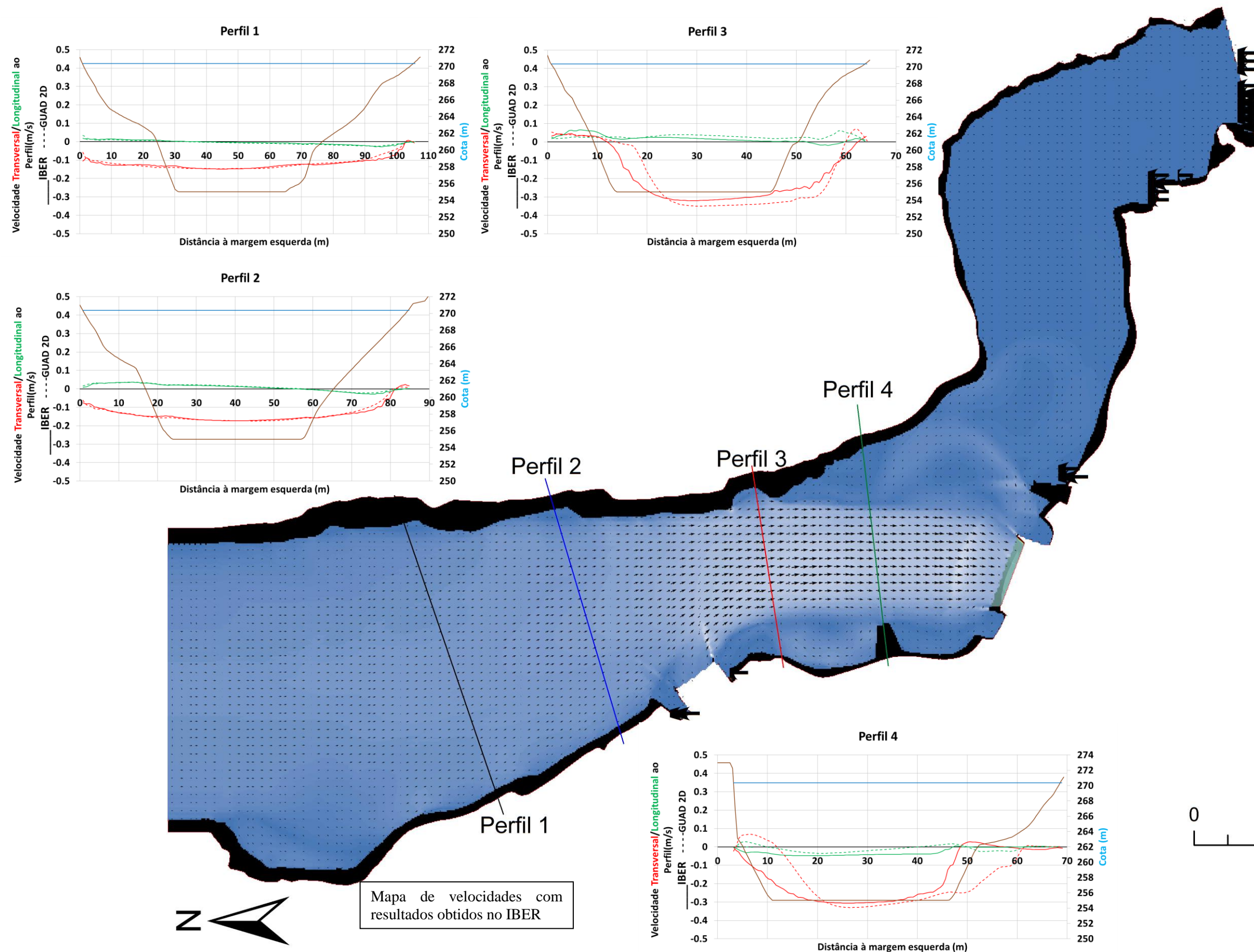




**APÊNDICE B**  
**OPERAÇÕES DE TURBINAMENTO E BOMBAGEM EM SIMULTÂNEO**







## Apêndice B1

### Legenda

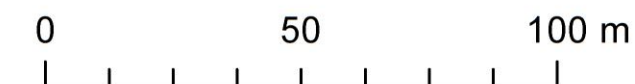
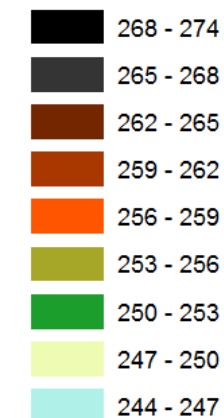
#### Velocidade (m/s)



#### Terreno

— Limite

#### Cota (m)

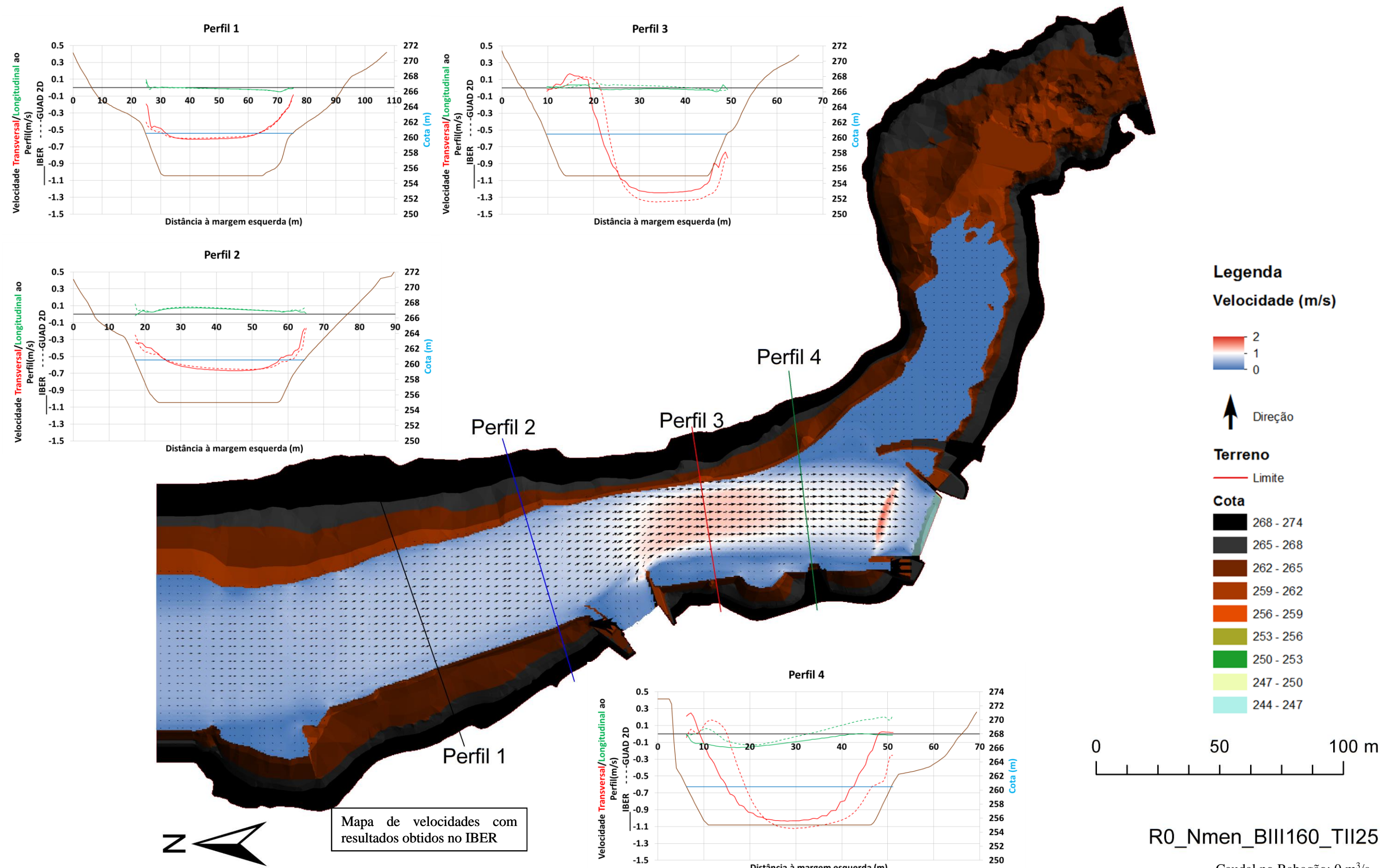


R0\_NPA\_BIII160\_TII25

Caudal no Rabagão: 0 m<sup>3</sup>/s  
Nível da Albufeira: NPA=270.36 m  
Bombagem em VN III de 160 m<sup>3</sup>/s  
Turbinamento em VN II de 25 m<sup>3</sup>/s







R0\_Nmen\_BIII160\_TII25

Caudal no Rabagão: 0 m<sup>3</sup>/s  
Nível da Albufeira: Nmen=260.56 m  
Bombagem em VN III de 160 m<sup>3</sup>/s  
Turbinamento em VN II de 25 m<sup>3</sup>/s

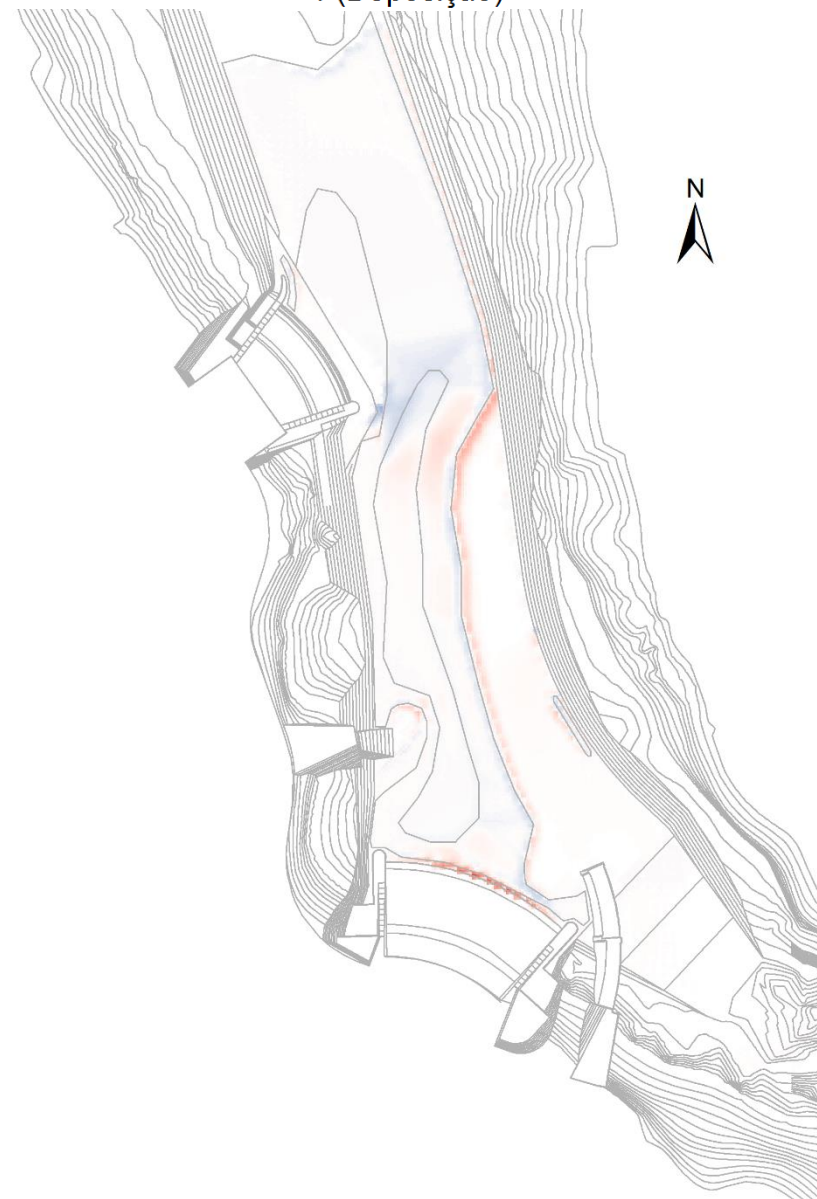
## Legenda

Erosão (m)

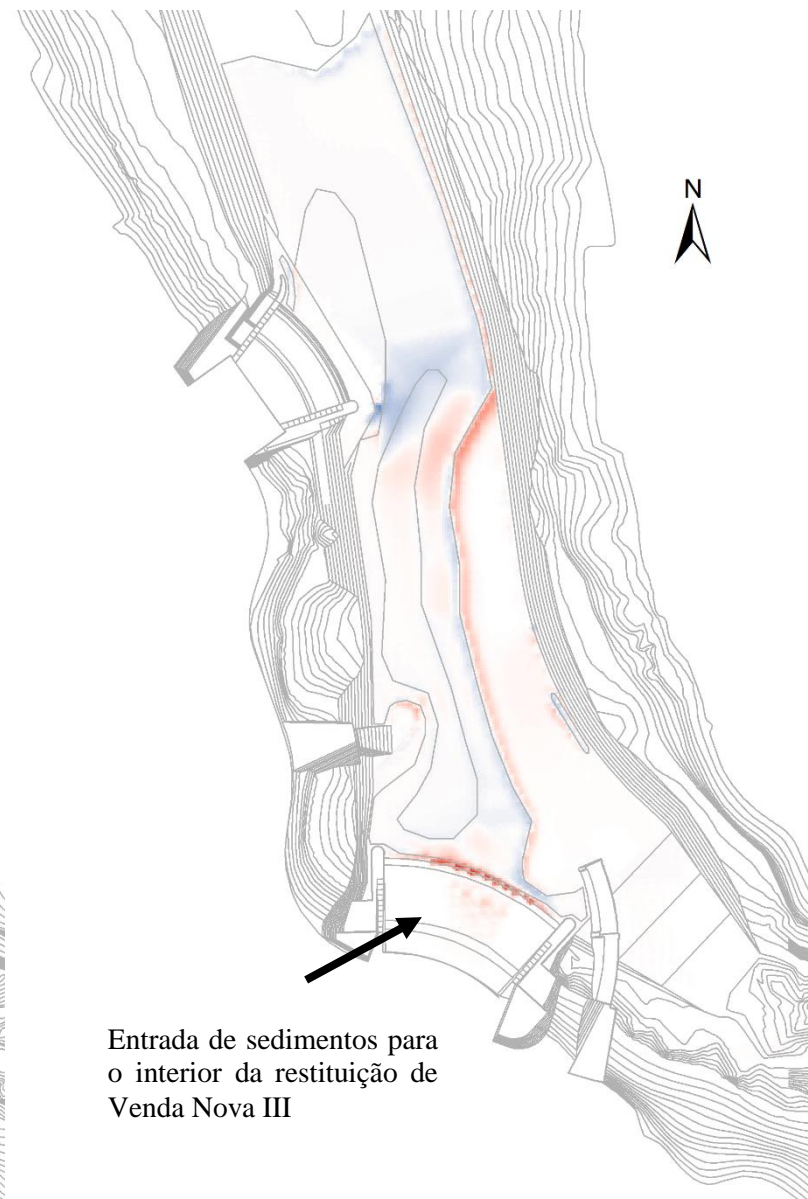
3h

1 (Erosão)

-1 (Deposição)



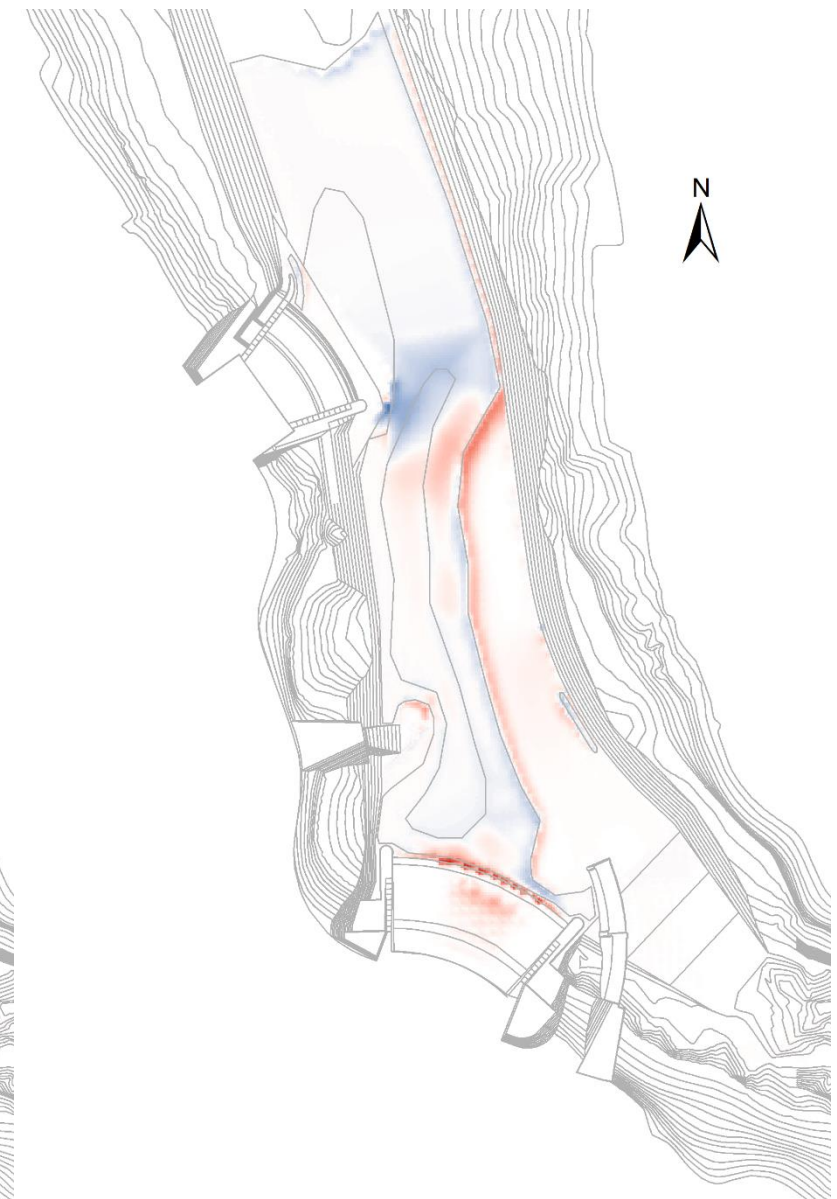
6h



Entrada de sedimentos para  
o interior da restituição de  
Venda Nova III

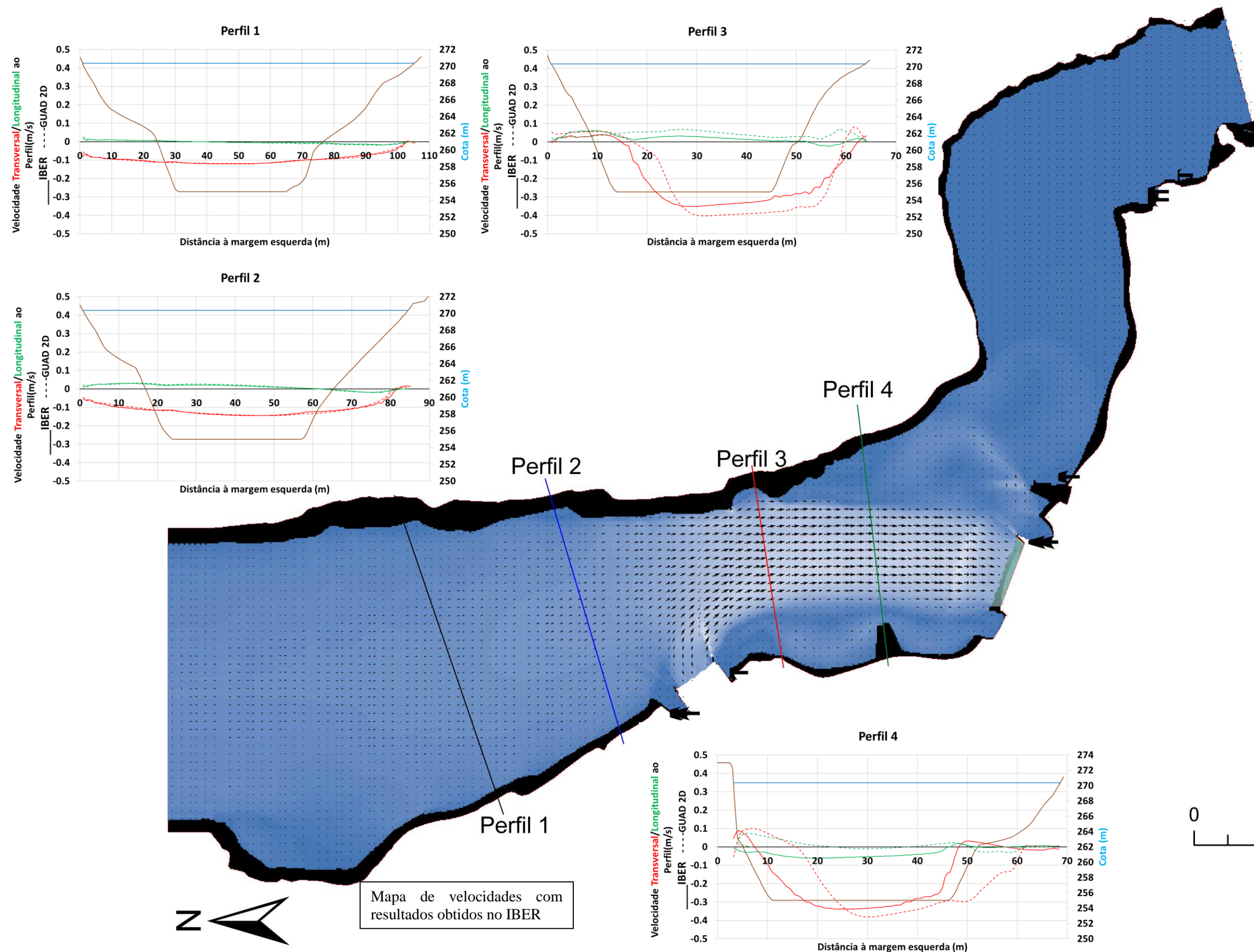
0 50 100 m

10h



Resultados relativos a transporte de sedimentos para o cenário R0\_Nmen\_BIII160\_TII25





## Apêndice B2

### Legenda

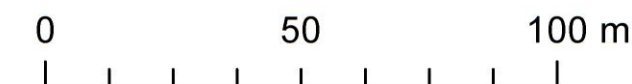
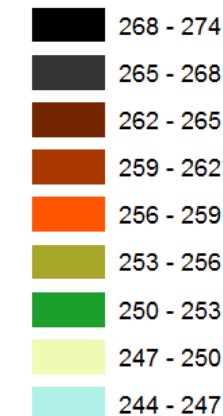
#### Velocidade (m/s)



#### Terreno

— Limite

#### Cota (m)

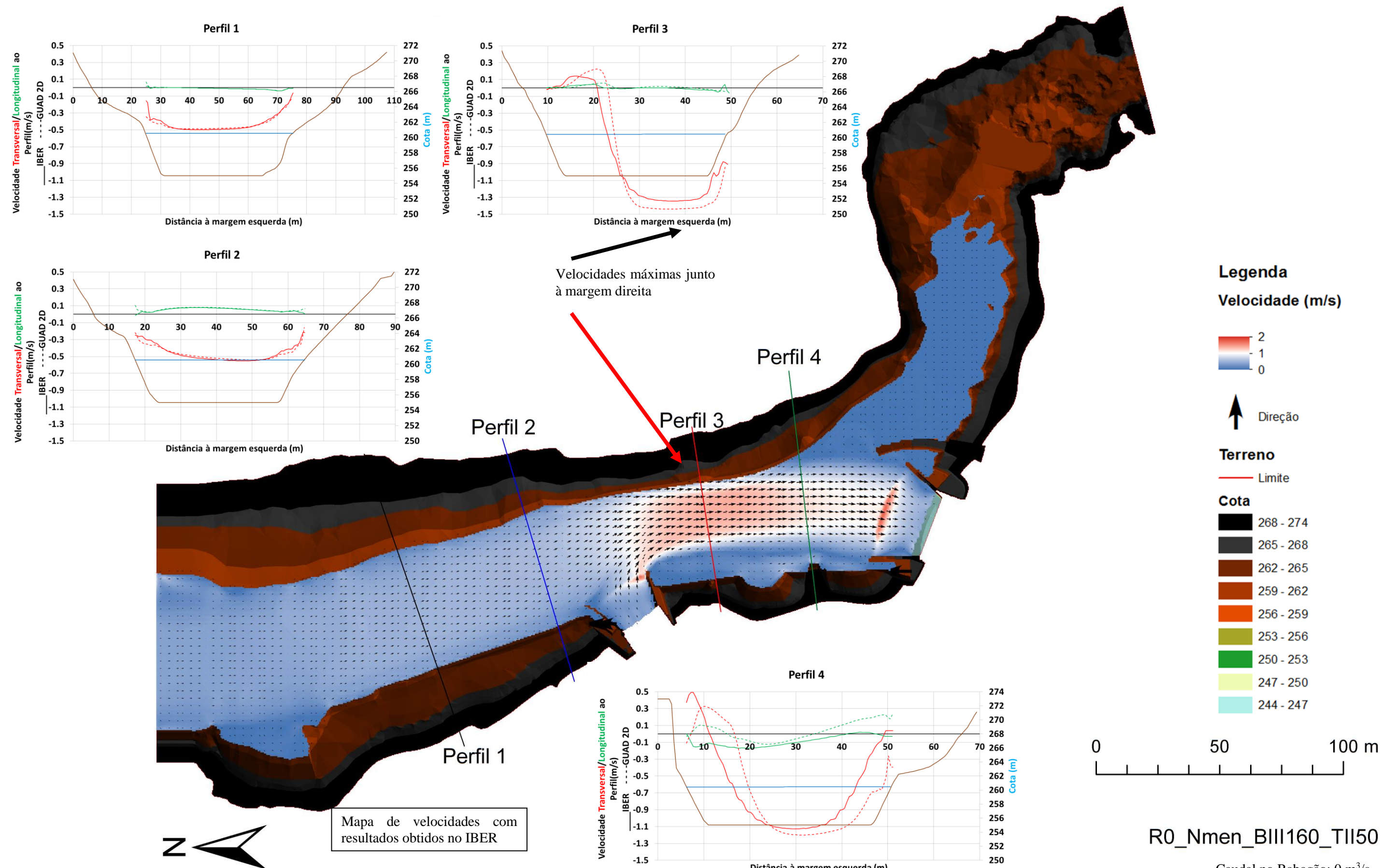


R0\_NPA\_BIII160\_TII50

Caudal no Rabagão: 0 m<sup>3</sup>/s  
 Nível da Albufeira: NPA=270.36 m  
 Bombagem em VN III de 160 m<sup>3</sup>/s  
 Turbinamento em VN II de 25 m<sup>3</sup>/s







R0\_Nmen\_BIII160\_TII50

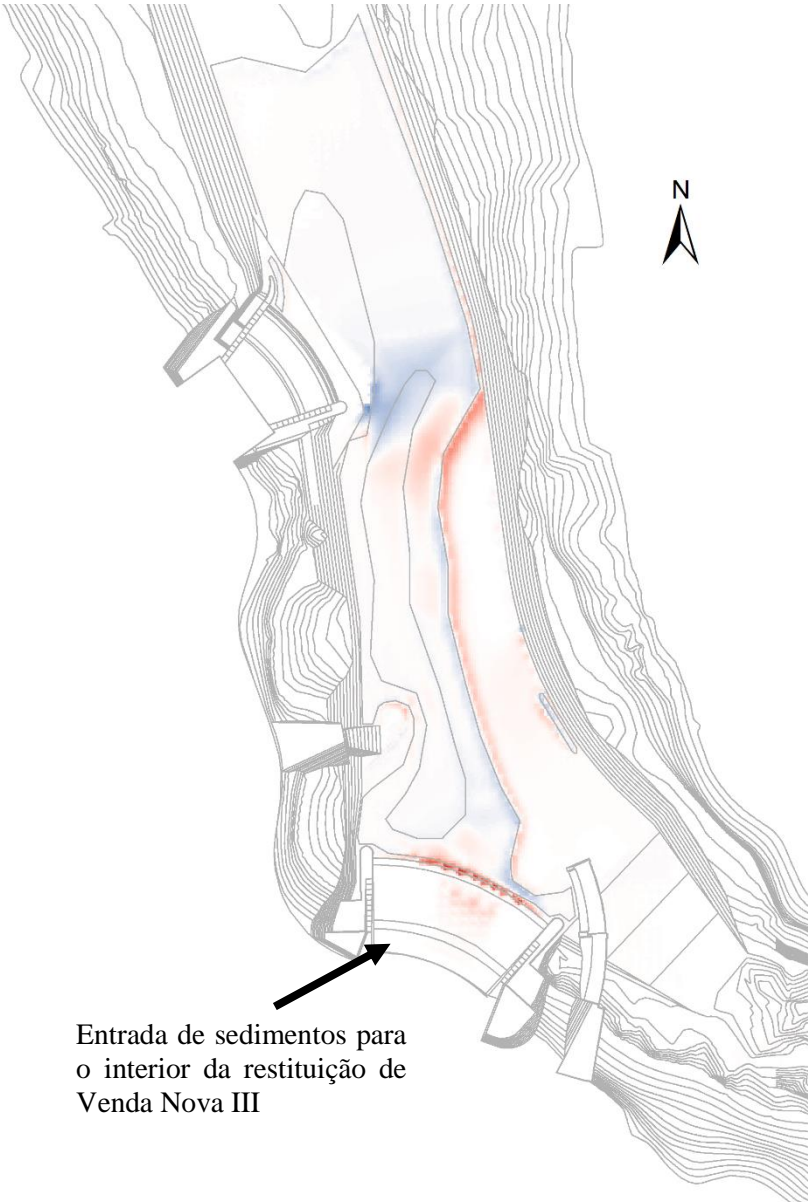
Caudal no Rabagão: 0 m³/s  
Nível da Albufeira: Nmen=260.56 m  
Bombagem em VN III de 160 m³/s  
Turbinamento em VN II de 50 m³/s

Legenda

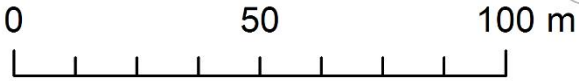
Erosão (m)



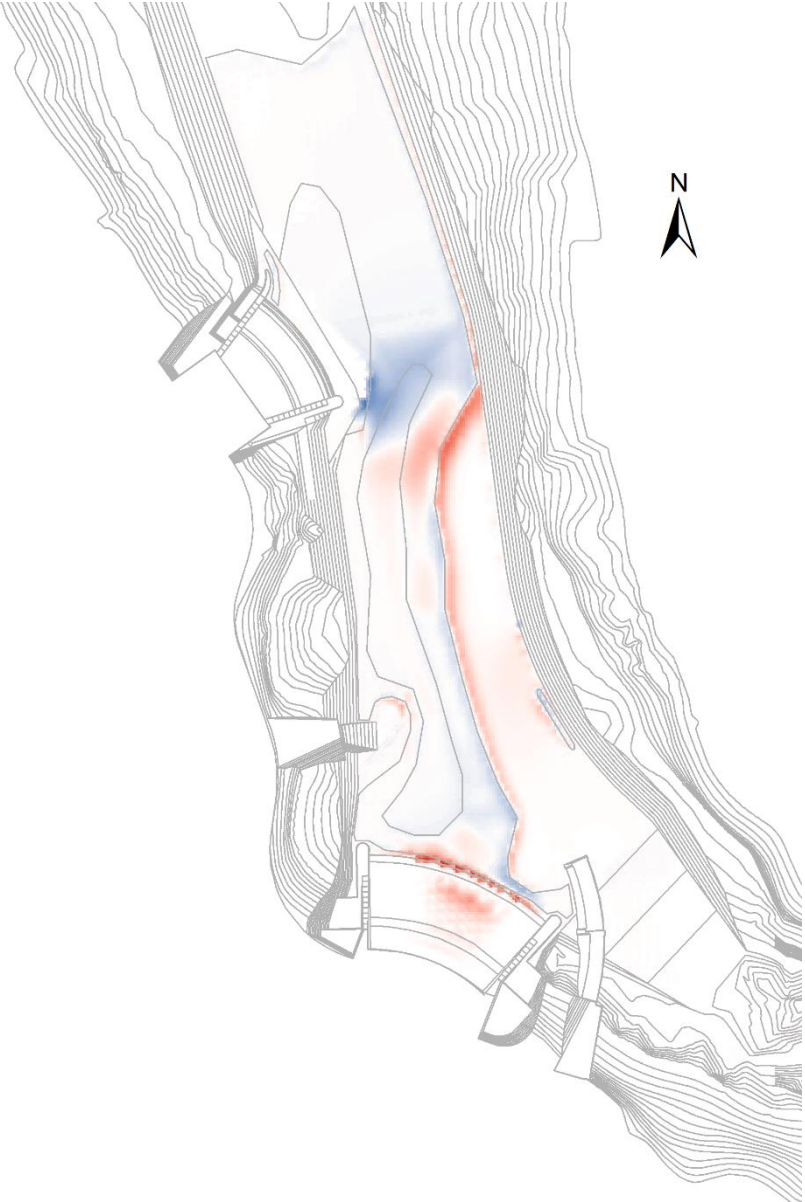
6h



Entrada de sedimentos para  
o interior da restituição de  
Venda Nova III

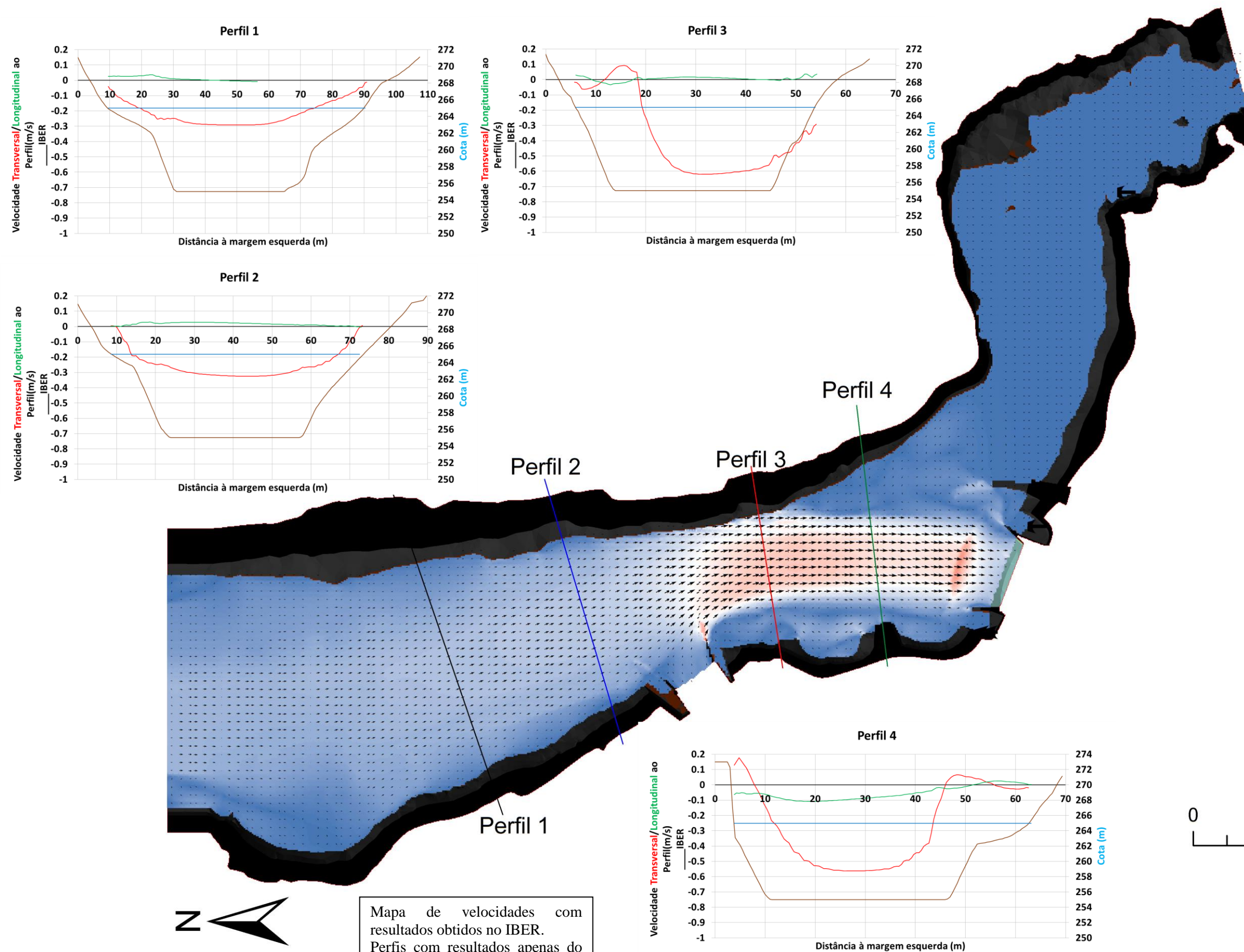


10h



Resultados relativos a transporte de sedimentos para o cenário R0\_Nmen\_BIII160\_TII50





## Apêndice B3

### Legenda

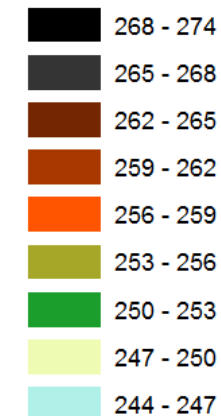
#### Velocidade (m/s)



#### Terreno

— Limite

#### Cota (m)



R0\_265\_BIII160\_TII25

Caudal no Rabagão: 0 m<sup>3</sup>/s  
Nível da Albufeira: 265.00 m  
Bombagem em VN III de 160 m<sup>3</sup>/s  
Turbinamento em VN II de 25 m<sup>3</sup>/s

## Legenda

Erosão (m)

3h

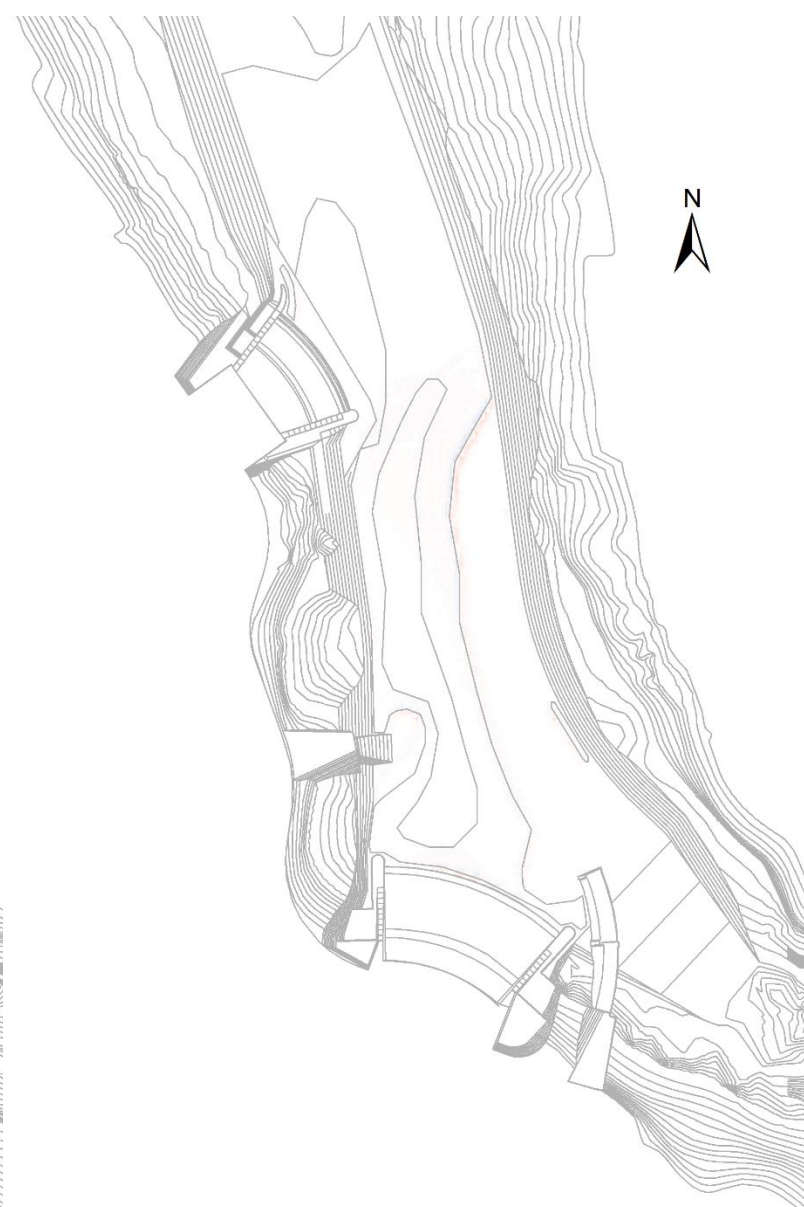
1 (Erosão)



-1 (Deposição)

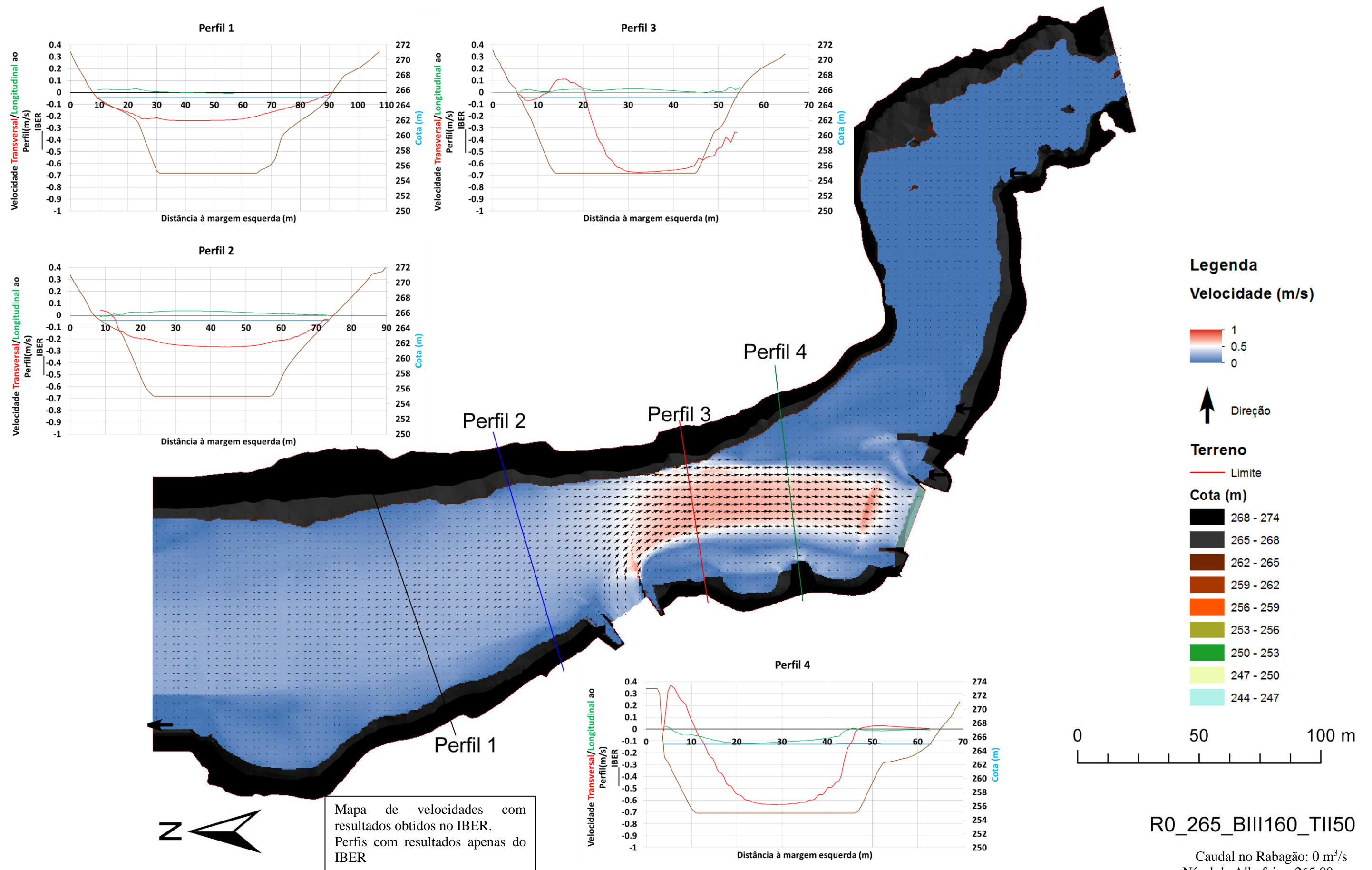


6h



Resultados relativos a transporte de sedimentos para o cenário R0\_265\_BIII160\_TII25





R0\_265\_BIII160\_TII50

Caudal no Rabagão: 0 m<sup>3</sup>/s  
Nível da Albufeira: 265.00 m  
Bombagem em VN III de 160 m<sup>3</sup>/s  
Turbinamento em VN II de 50 m<sup>3</sup>/s

# Legenda

## Erosão (m)

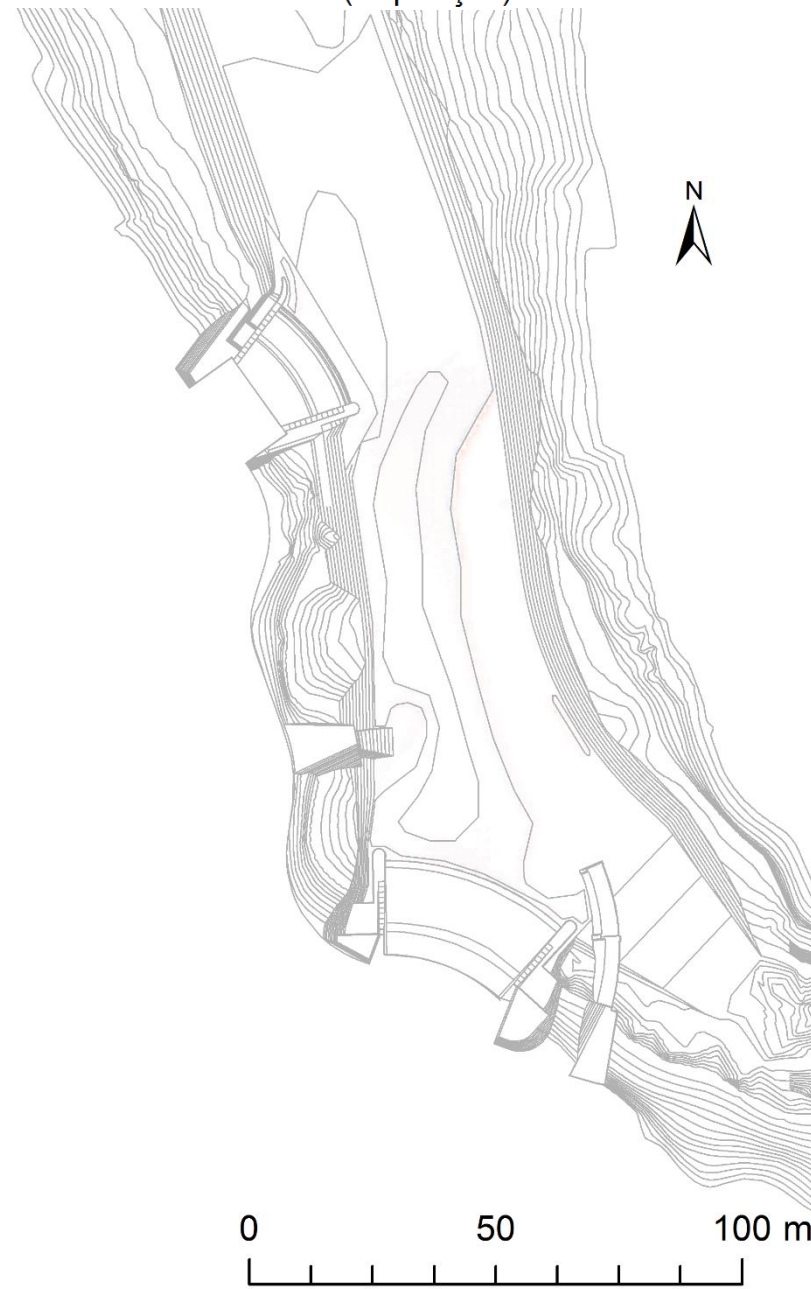
3h



1 (Erosão)

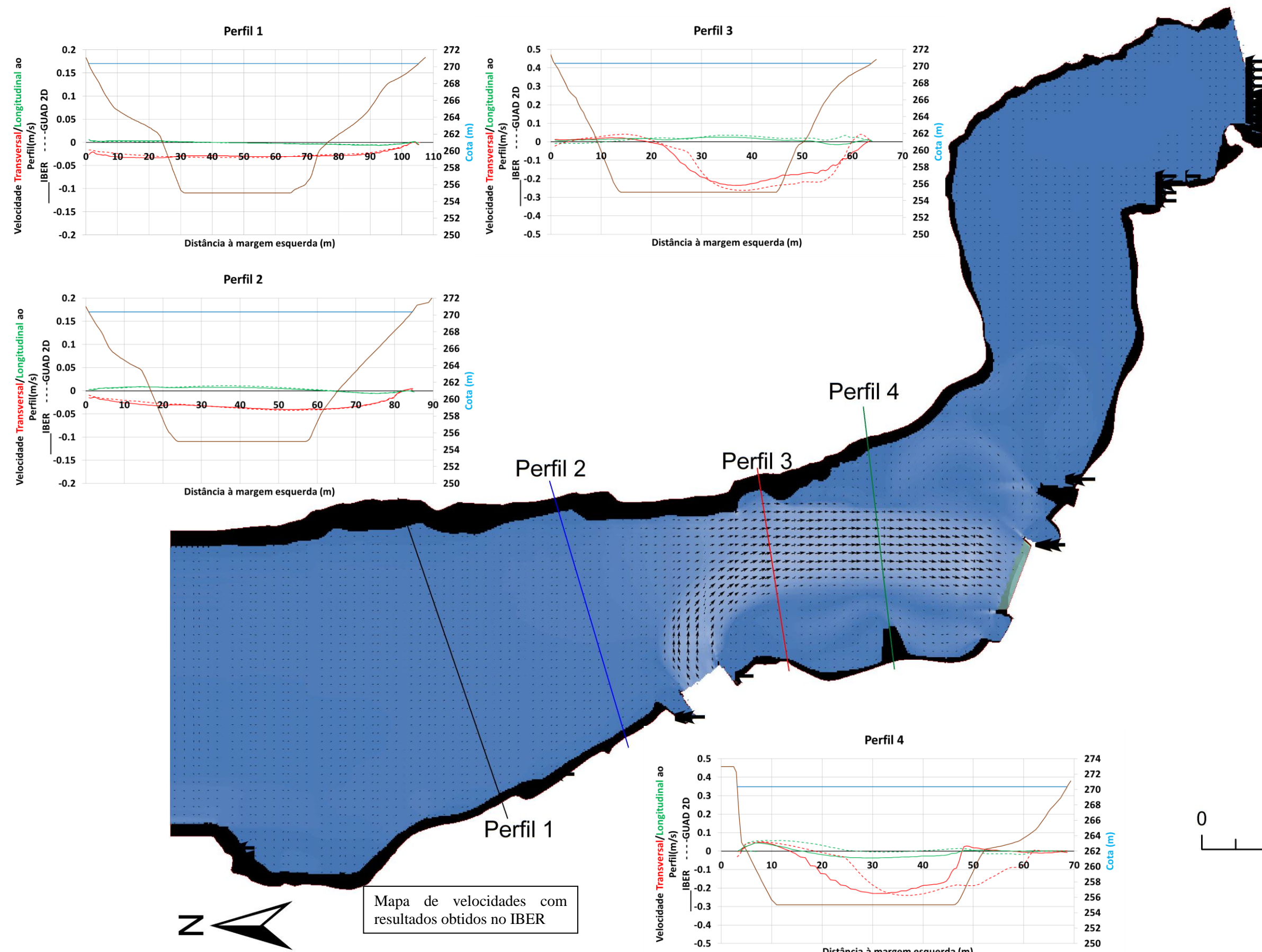
-1 (Deposição)

6h



Resultados relativos a transporte de sedimentos para o cenário R0\_265\_BIII160\_TII50

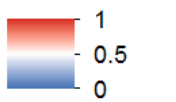




Apêndice B4

Legenda

Velocidade (m/s)

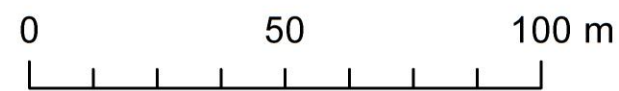


Terreno

— Limite

Cota (m)

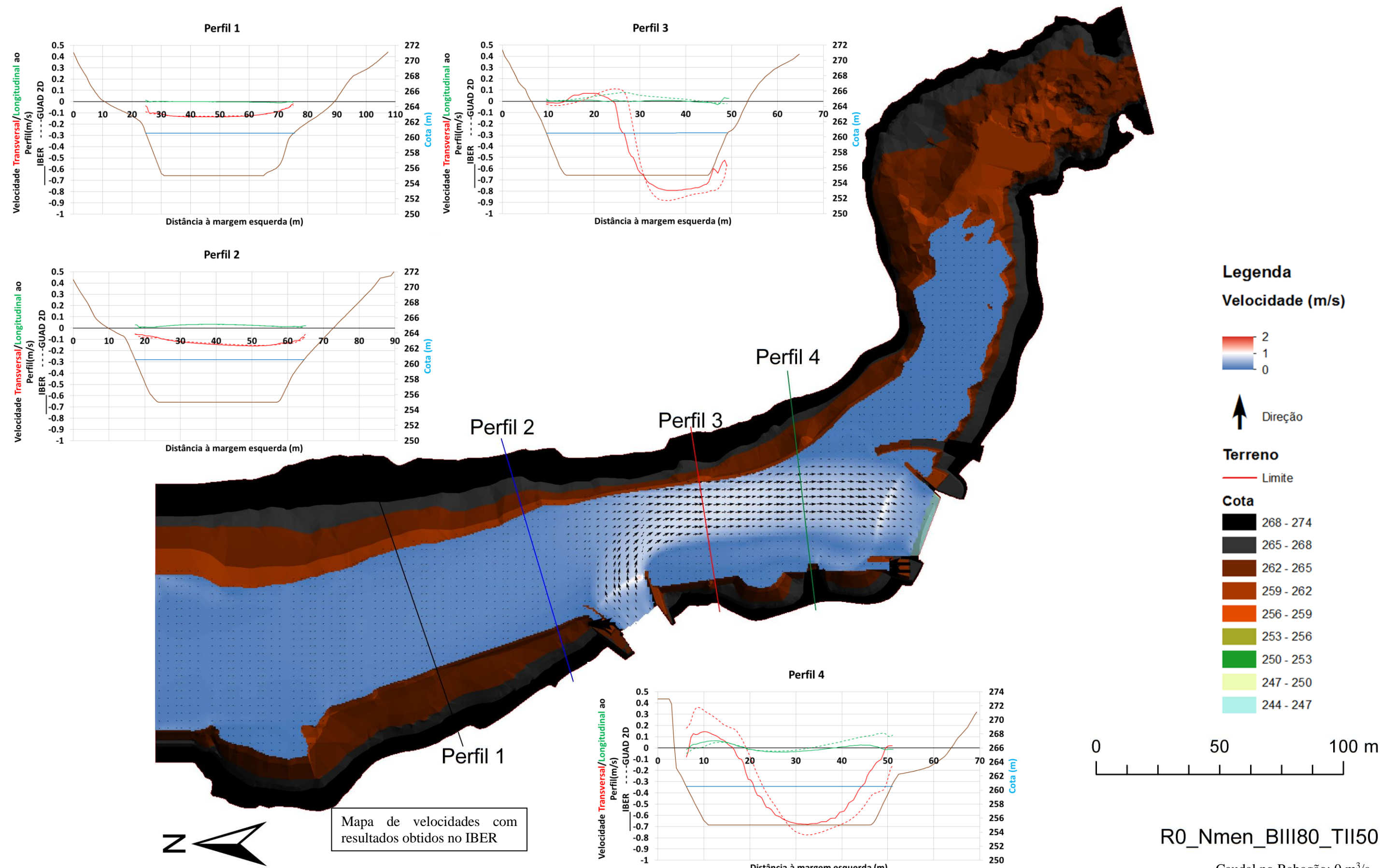
- 268 - 274
- 265 - 268
- 262 - 265
- 259 - 262
- 256 - 259
- 253 - 256
- 250 - 253
- 247 - 250
- 244 - 247



R0\_NPA\_BIII80\_TII50

Caudal no Rabagão: 0 m³/s  
Nível da Albufeira: NPA=270.36 m  
Bombagem em VN III de 80 m³/s  
Turbinamento em VN II de 50 m³/s

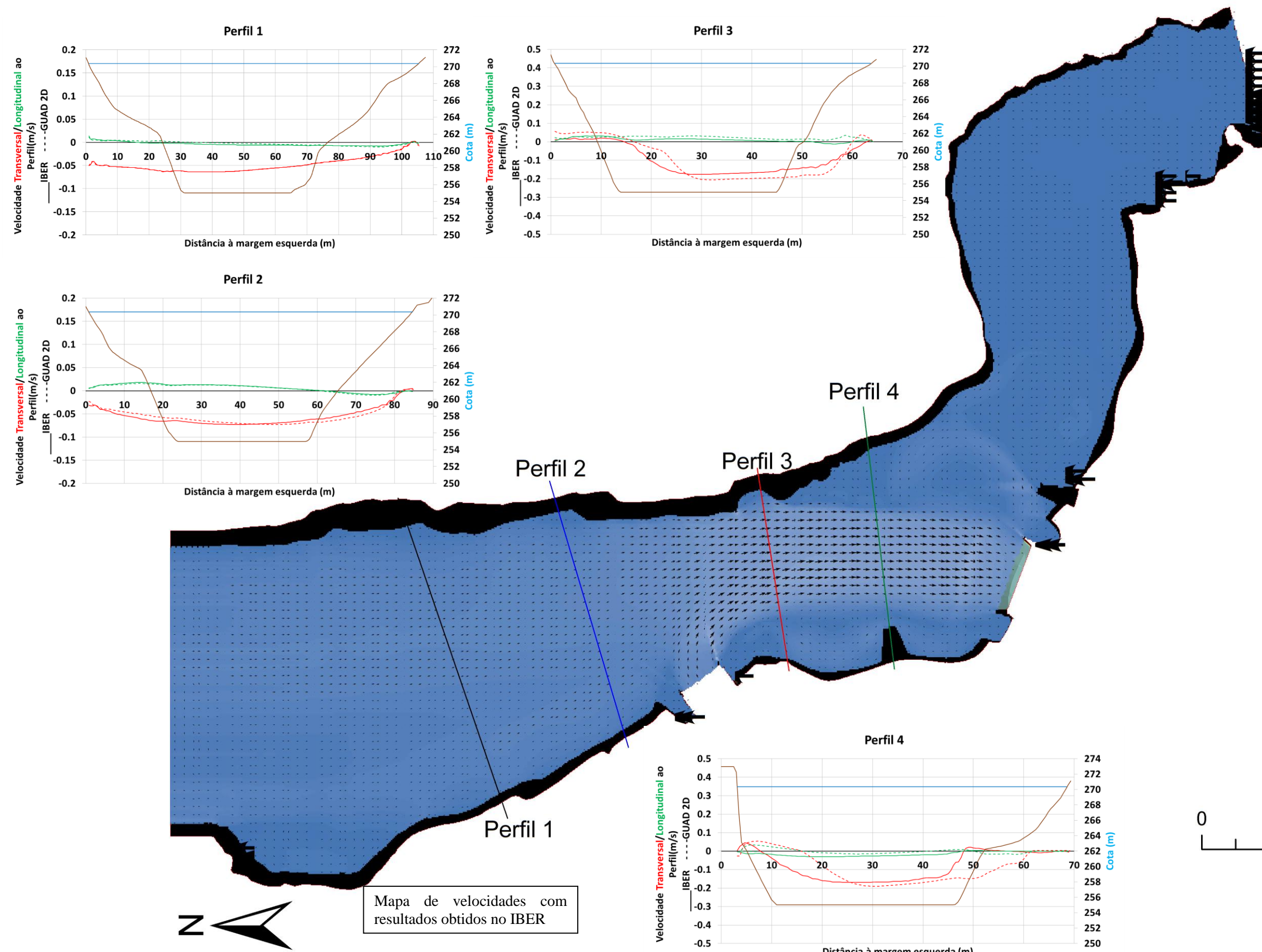




Mapa de velocidades com resultados obtidos no IBER







## Apêndice B5

### Legenda

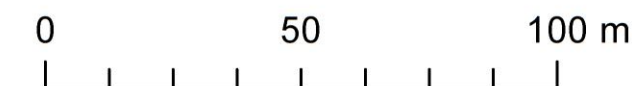
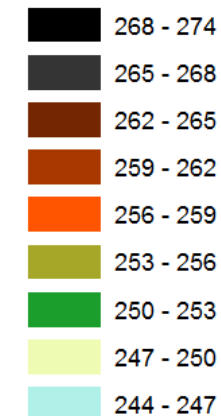
#### Velocidade (m/s)



#### Terreno

— Limite

#### Cota (m)

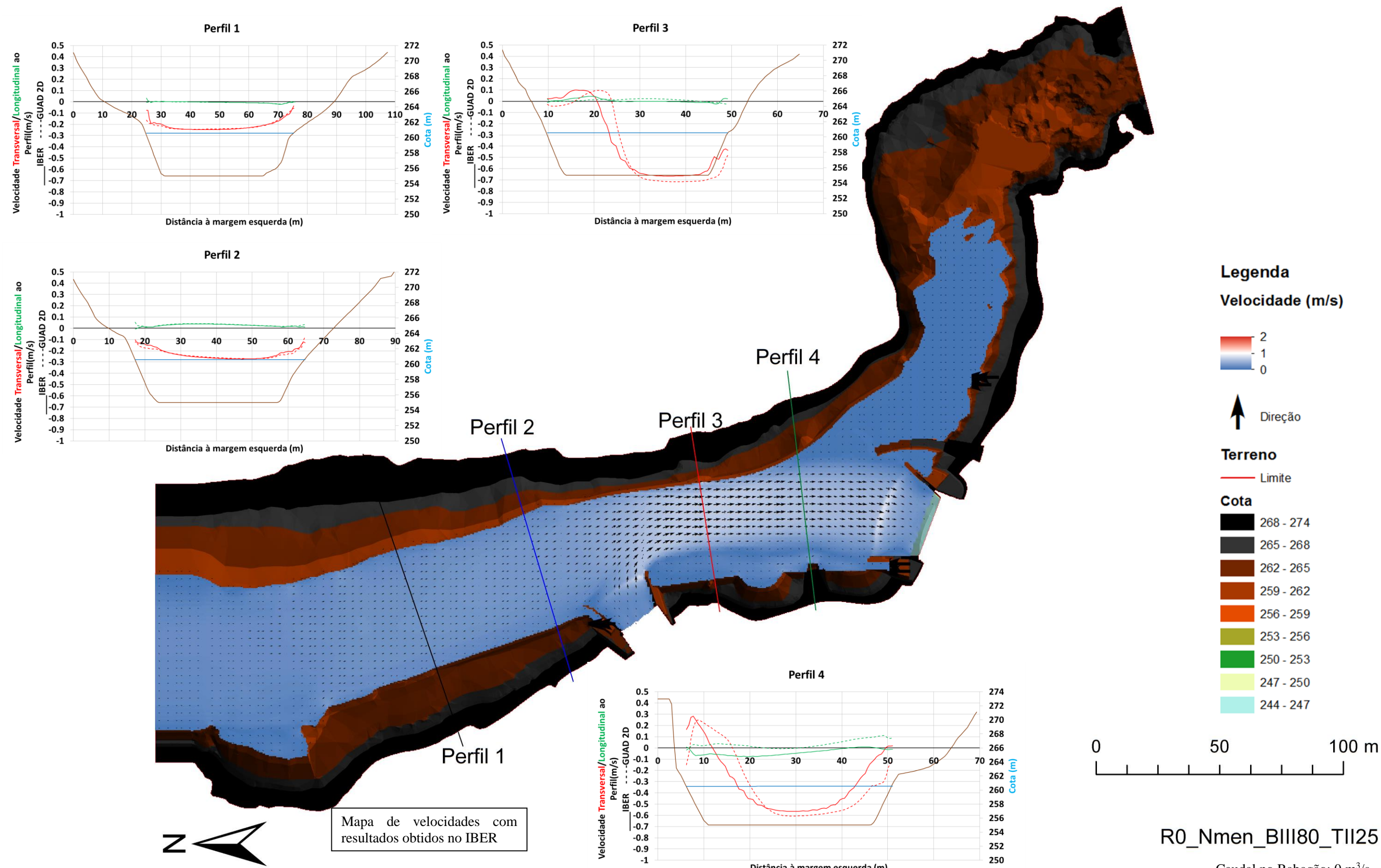


R0\_NPA\_BIII80\_TII25

Caudal no Rabagão: 0 m<sup>3</sup>/s  
Nível da Albufeira: NPA=270.36 m  
Bombagem em VN III de 80 m<sup>3</sup>/s  
Turbinamento em VN II de 25 m<sup>3</sup>/s





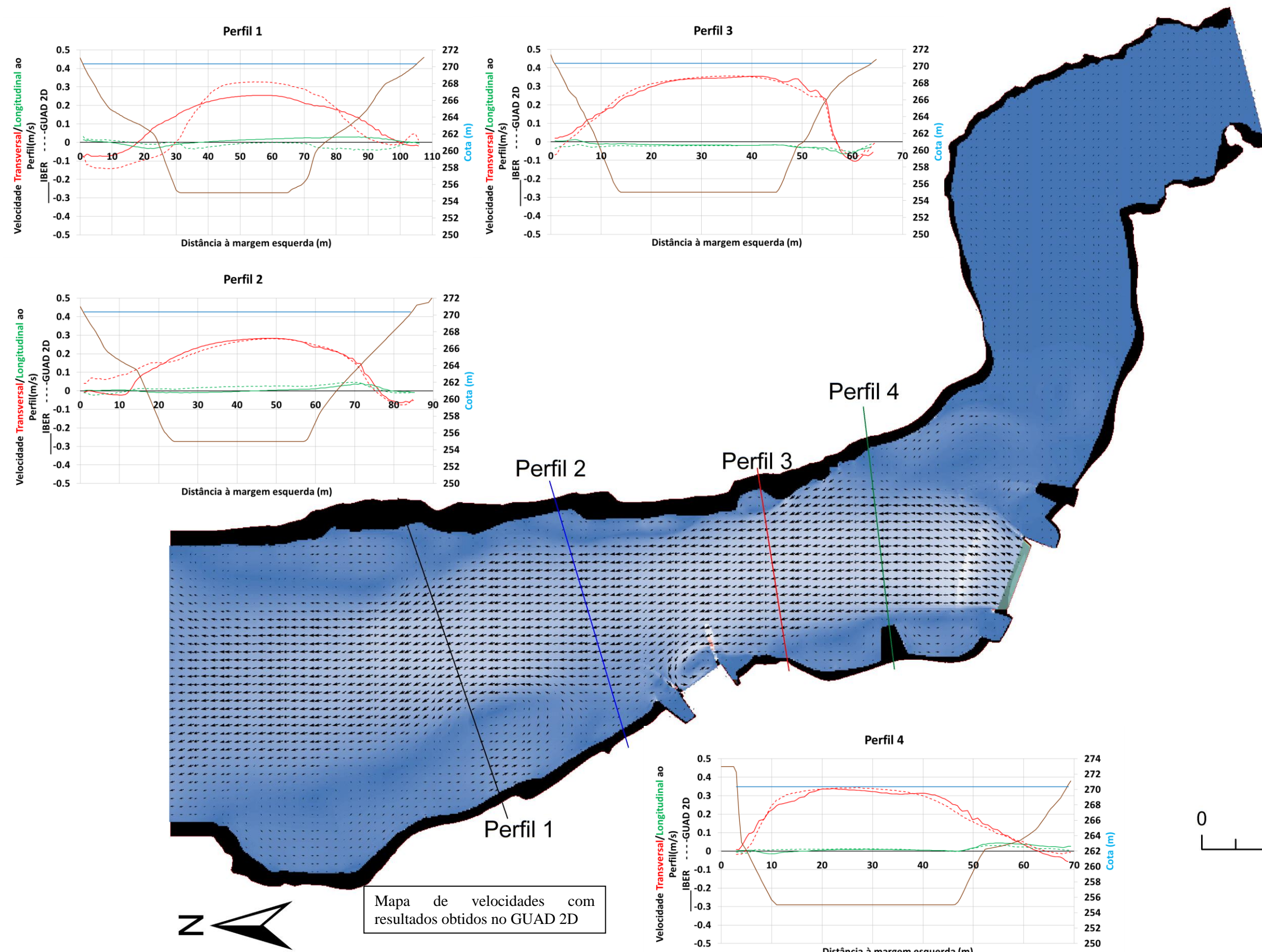


R0\_Nmen\_BIII80\_TII25

Caudal no Rabagão: 0 m³/s  
Nível da Albufeira: Nmen=260.56 m  
Bombagem em VN III de 80 m³/s  
Turbinamento em VN II de 25 m³/s







## Apêndice B6

### Legenda

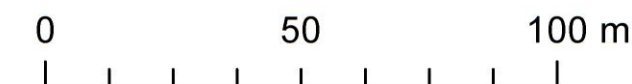
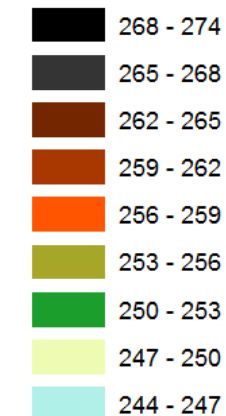
#### Velocidade (m/s)



#### Terreno

— Limite

#### Cota (m)

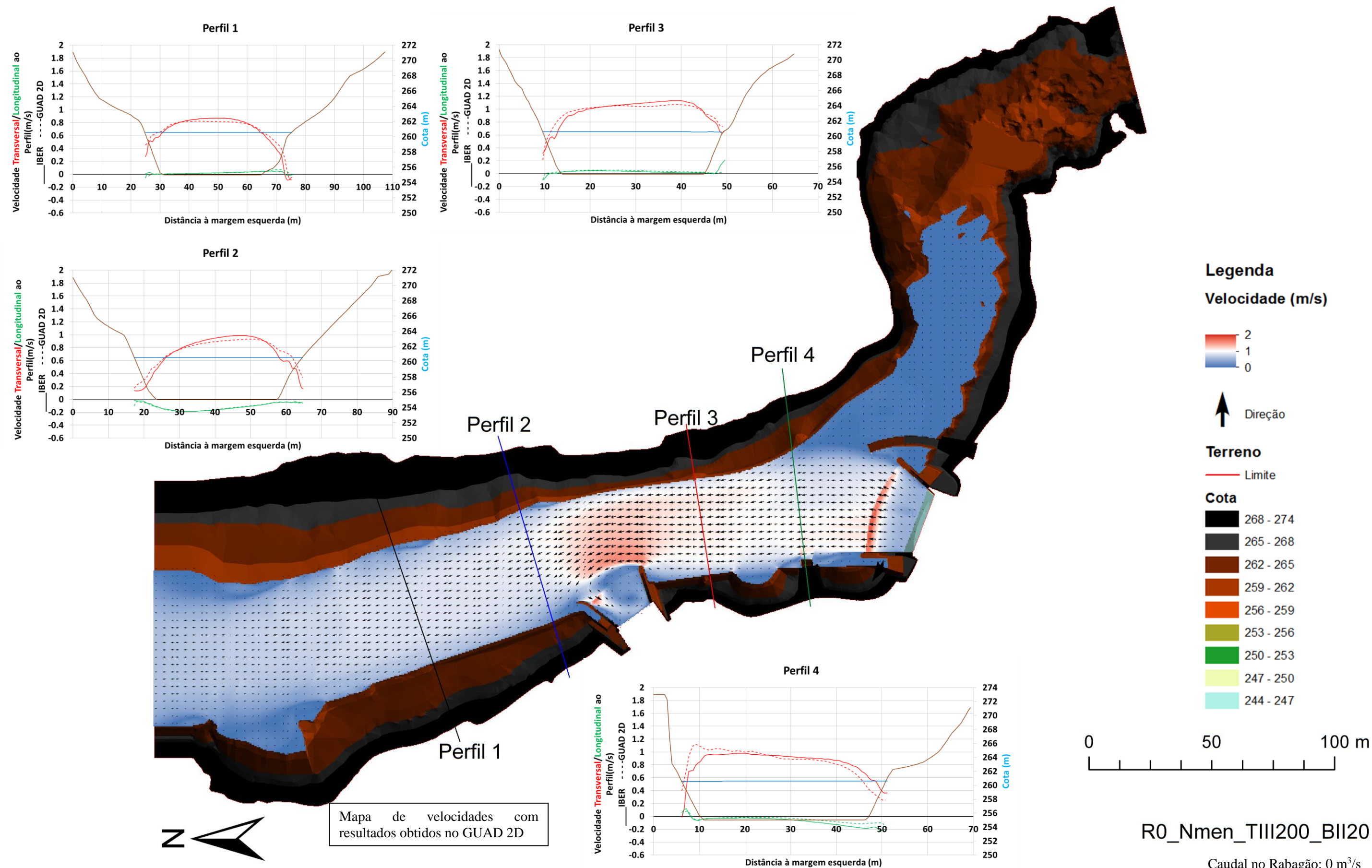


R0\_NPA\_TIII200\_BII20

Caudal no Rabagão: 0 m<sup>3</sup>/s  
 Nível da Albufeira: NPA=270.36 m  
 Turbinamento em VN III de 200 m<sup>3</sup>/s  
 Bombagem em VN II de 20 m<sup>3</sup>/s







Mapa de velocidades com resultados obtidos no GUAD 2D

R0\_Nmen\_TIII200\_BII20

Caudal no Rabagão: 0 m³/s  
Nível da Albufeira: Nmen=260.56 m  
Turbinamento em VN III de 200 m³/s  
Bombagem em VN II de 20 m³/s



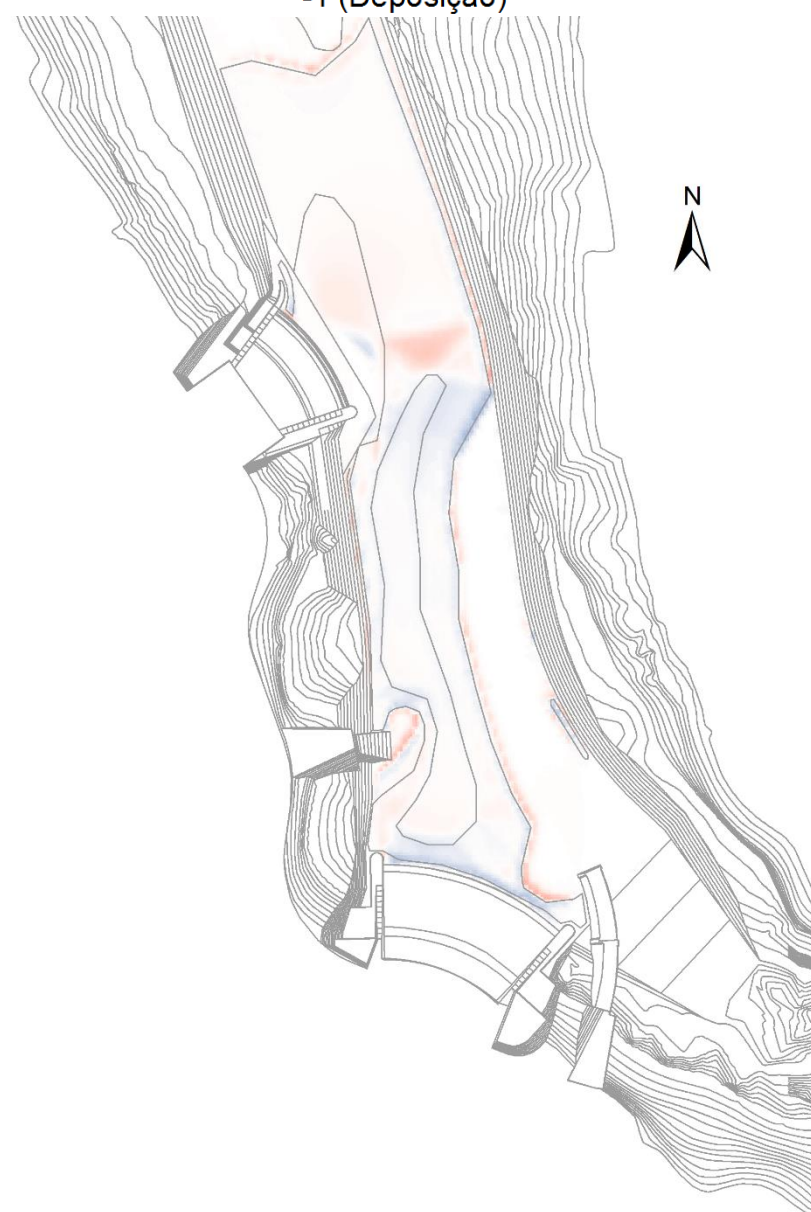
## Legenda

Erosão (m)

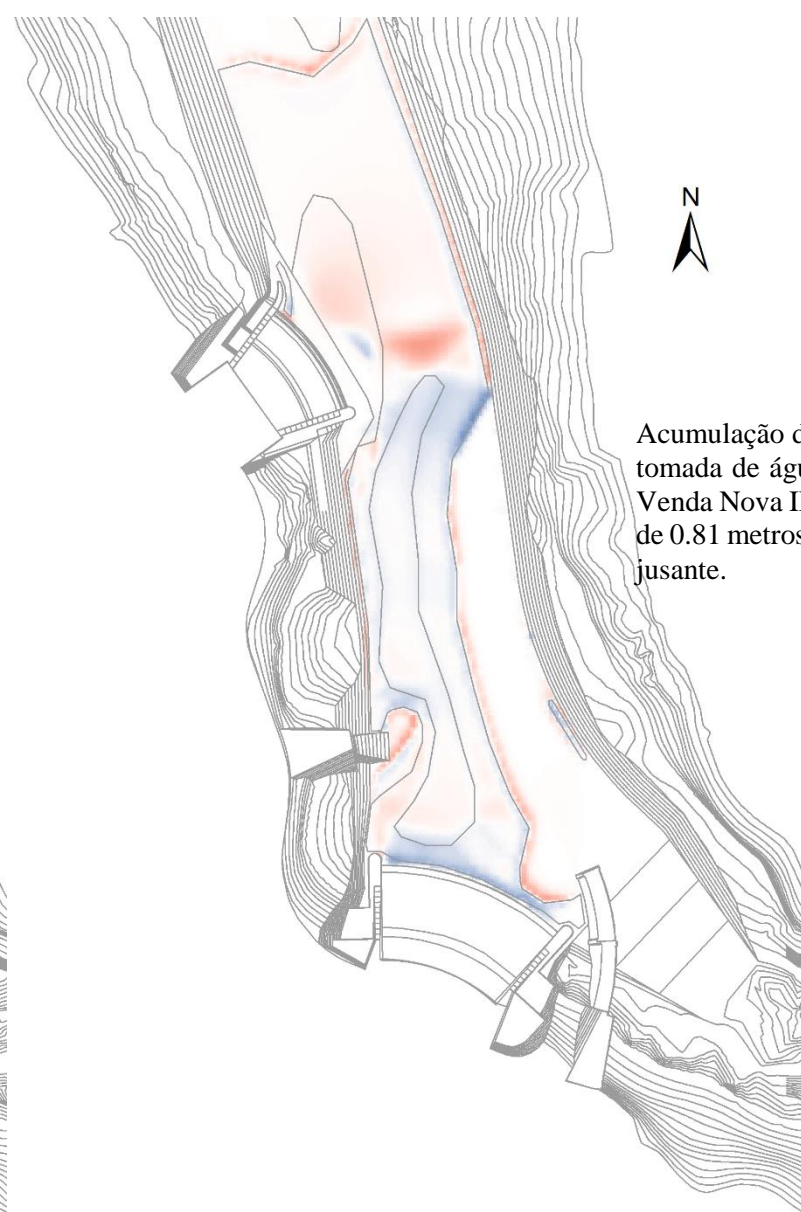
3h

1 (Erosão)

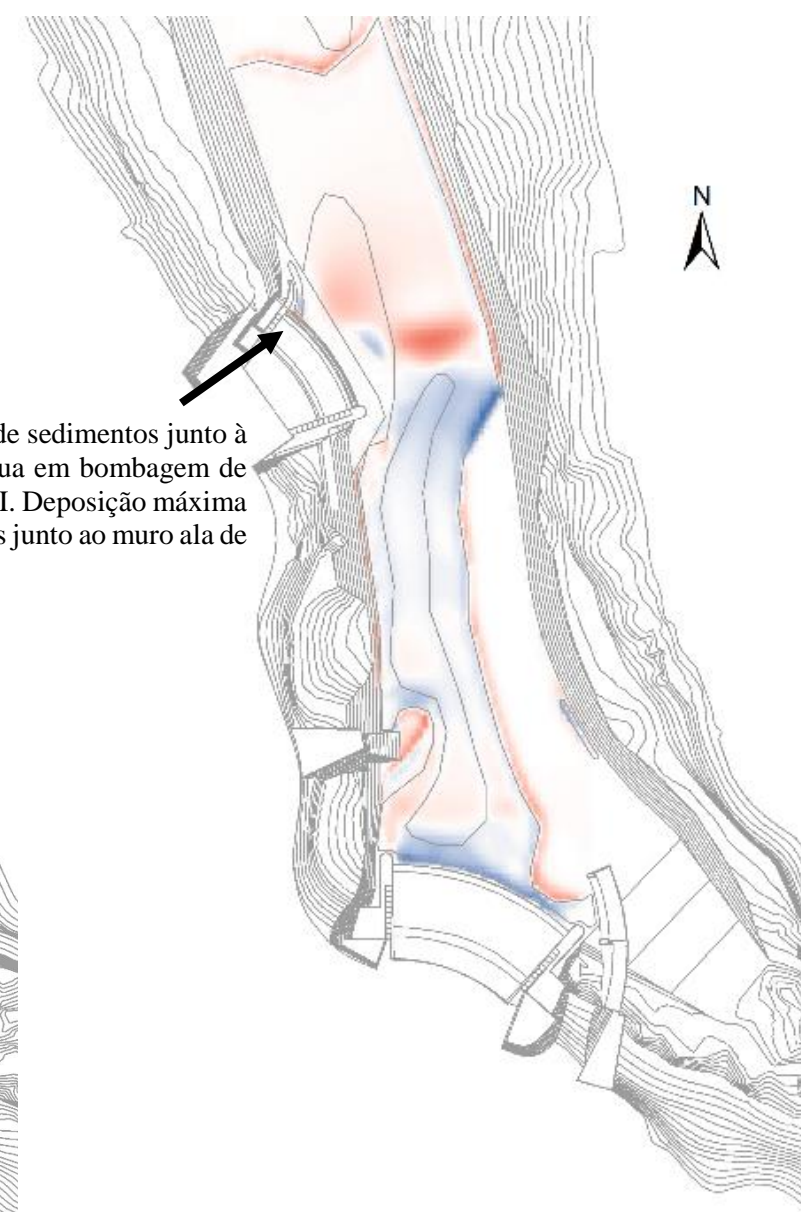
-1 (Deposição)



6h



10h

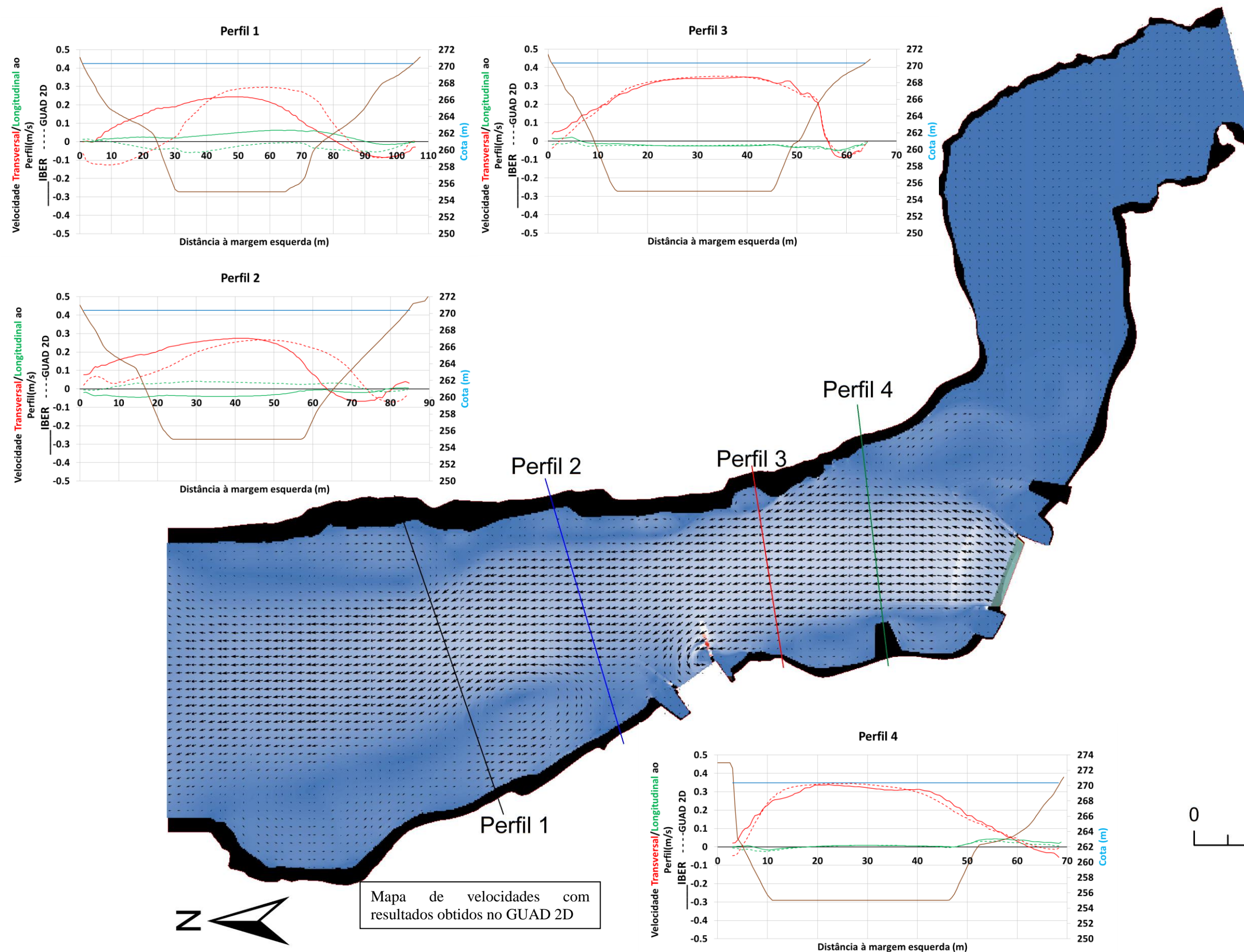


Acumulação de sedimentos junto à tomada de água em bombagem de Venda Nova II. Deposição máxima de 0.81 metros junto ao muro ala de jusante.

0 50 100 m

Resultados relativos a transporte de sedimentos para o cenário R0\_Nmen\_TIII200\_BII20

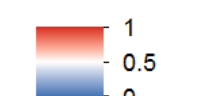




## Apêndice B7

### Legenda

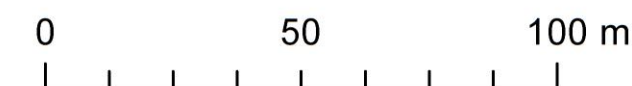
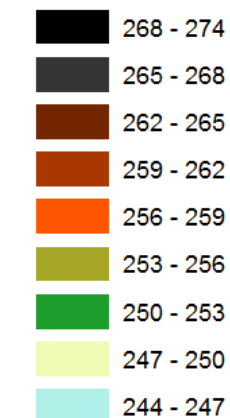
#### Velocidade (m/s)



#### Terreno

— Limite

#### Cota (m)

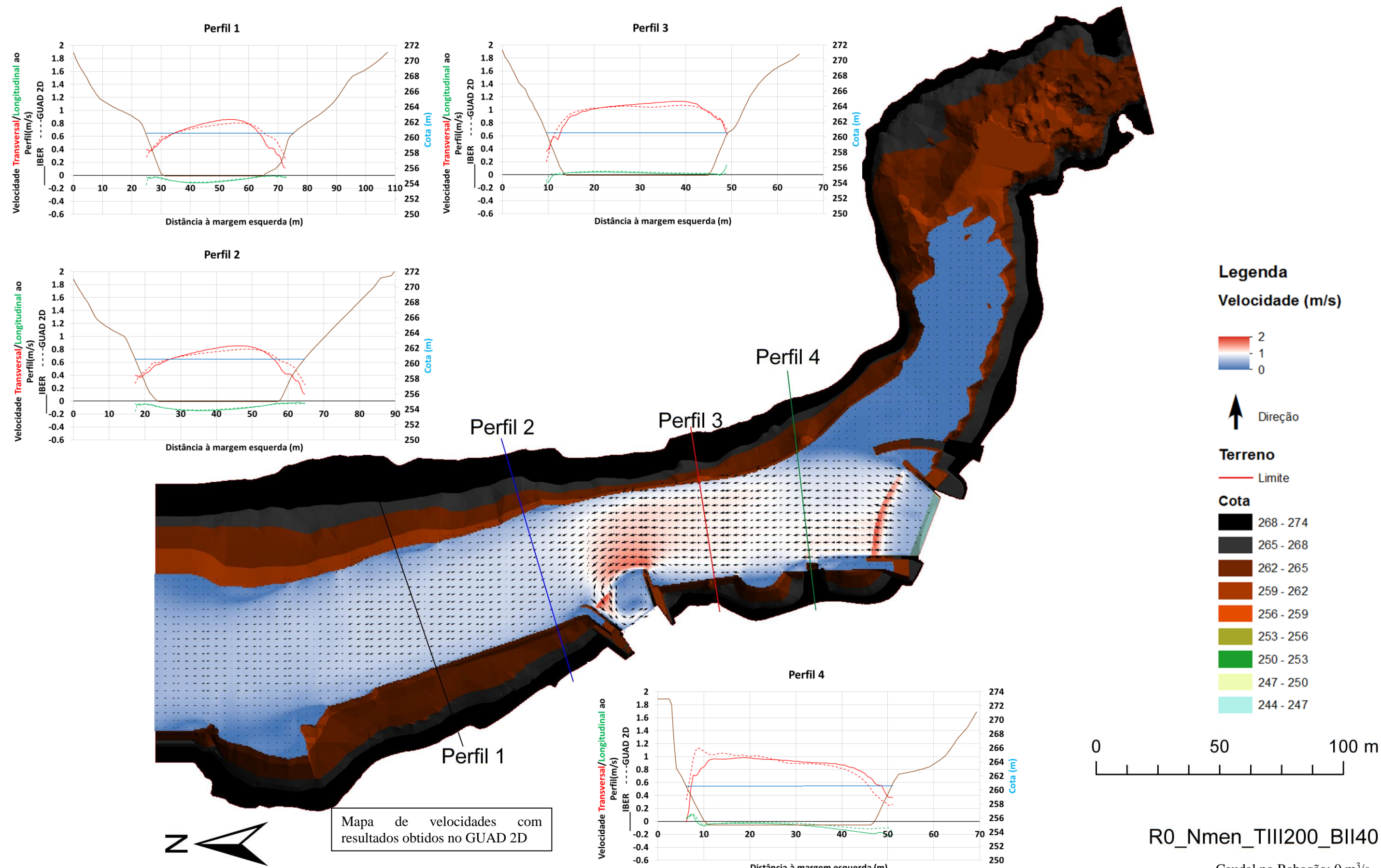


R0\_NPA\_TIII200\_BII40

Caudal no Rabagão: 0 m<sup>3</sup>/s  
 Nível da Albufeira: NPA=270.36 m  
 Turbinamento em VN III de 200 m<sup>3</sup>/s  
 Bombagem em VN II de 40 m<sup>3</sup>/s







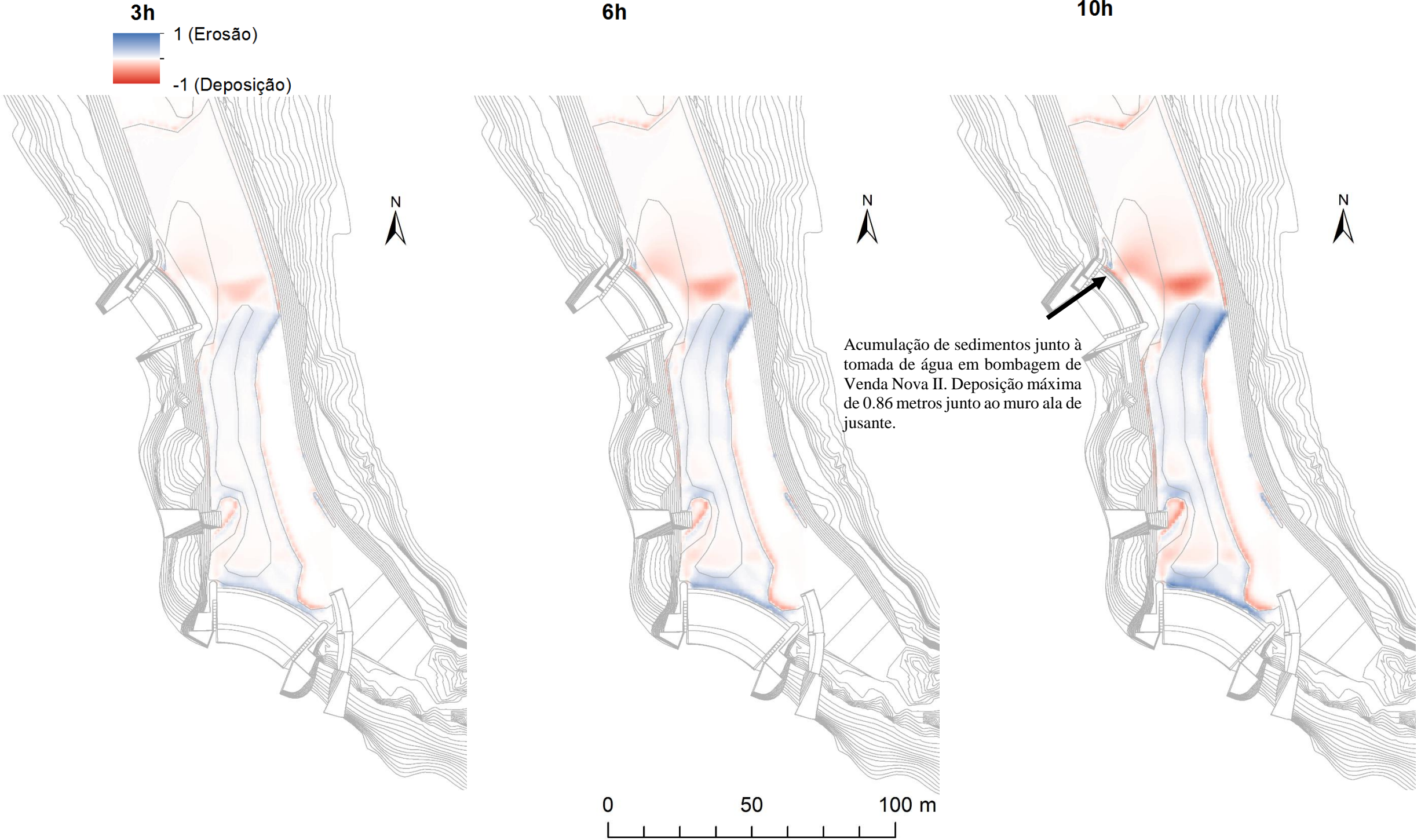
Mapa de velocidades com resultados obtidos no GUAD 2D

R0\_Nmen\_TIII200\_BII40

Caudal no Rabagão: 0 m<sup>3</sup>/s  
Nível da Albufeira: Nmen=260.56 m  
Turbinamento em VN III de 200 m<sup>3</sup>/s  
Bombagem em VN II de 40 m<sup>3</sup>/s

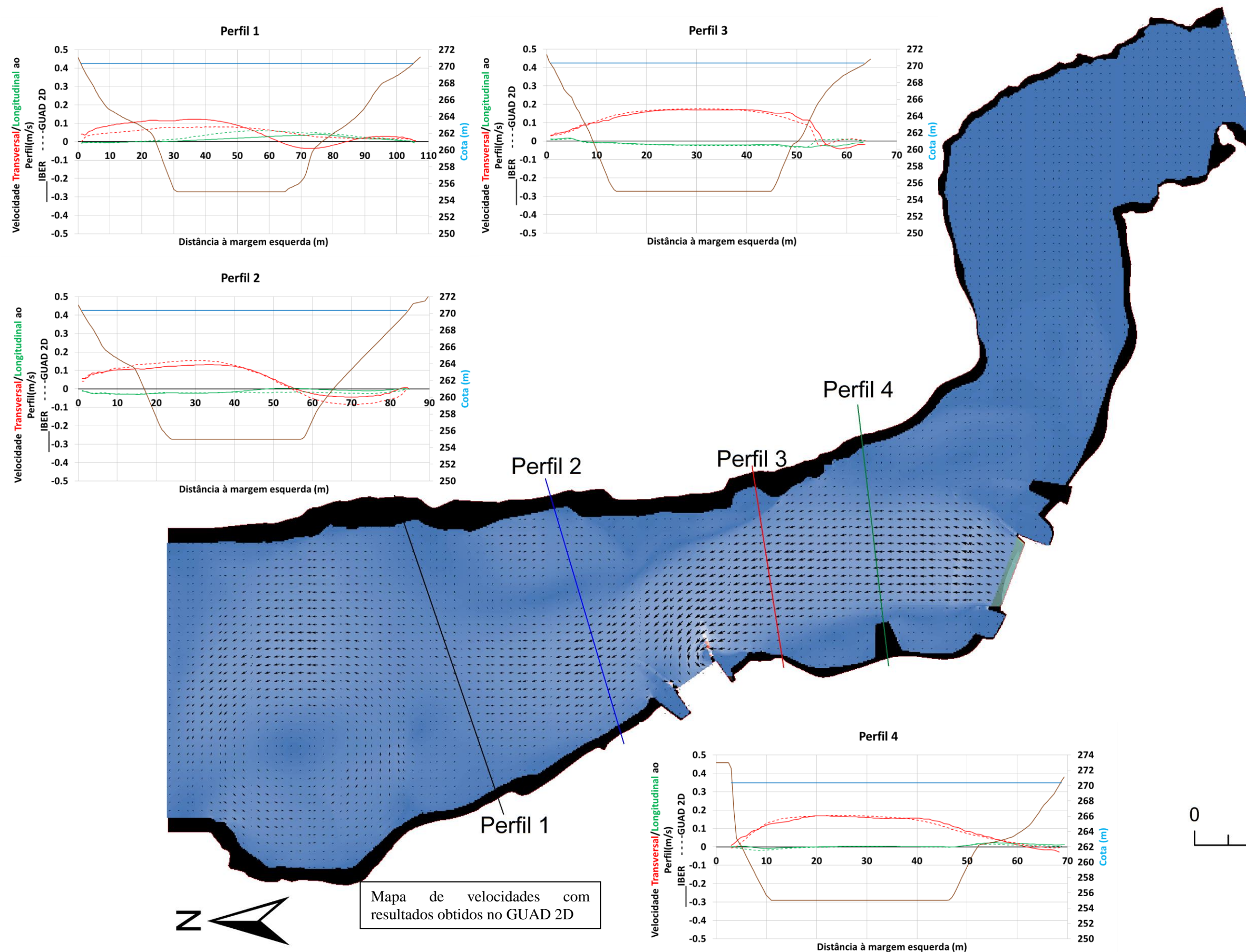
Legenda

Erosão (m)



Resultados relativos a transporte de sedimentos para o cenário R0\_Nmen\_TIII200\_BII40

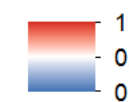




## Apêndice B8

### Legenda

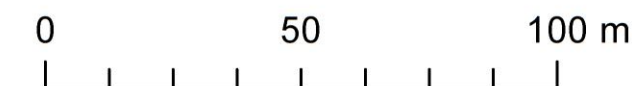
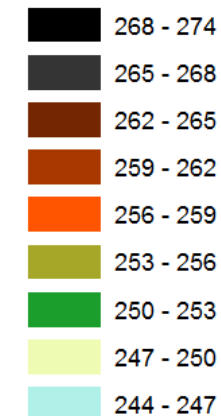
#### Velocidade (m/s)



#### Terreno

— Limite

#### Cota (m)

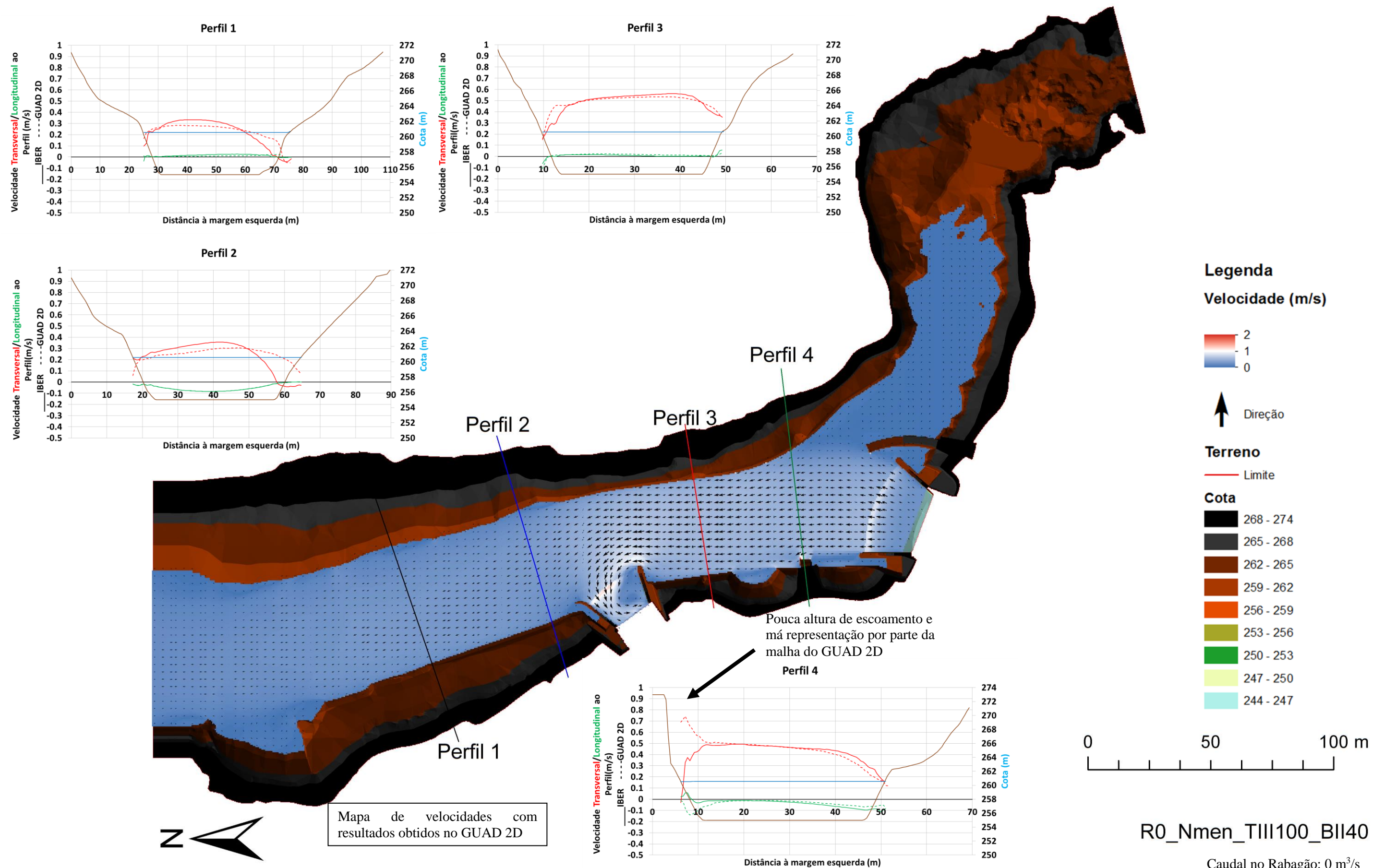


R0\_NPA\_TIII100\_BII40

Caudal no Rabagão: 0 m<sup>3</sup>/s  
Nível da Albufeira: NPA=270.36 m  
Turbinamento em VN III de 100 m<sup>3</sup>/s  
Bombagem em VN II de 40 m<sup>3</sup>/s

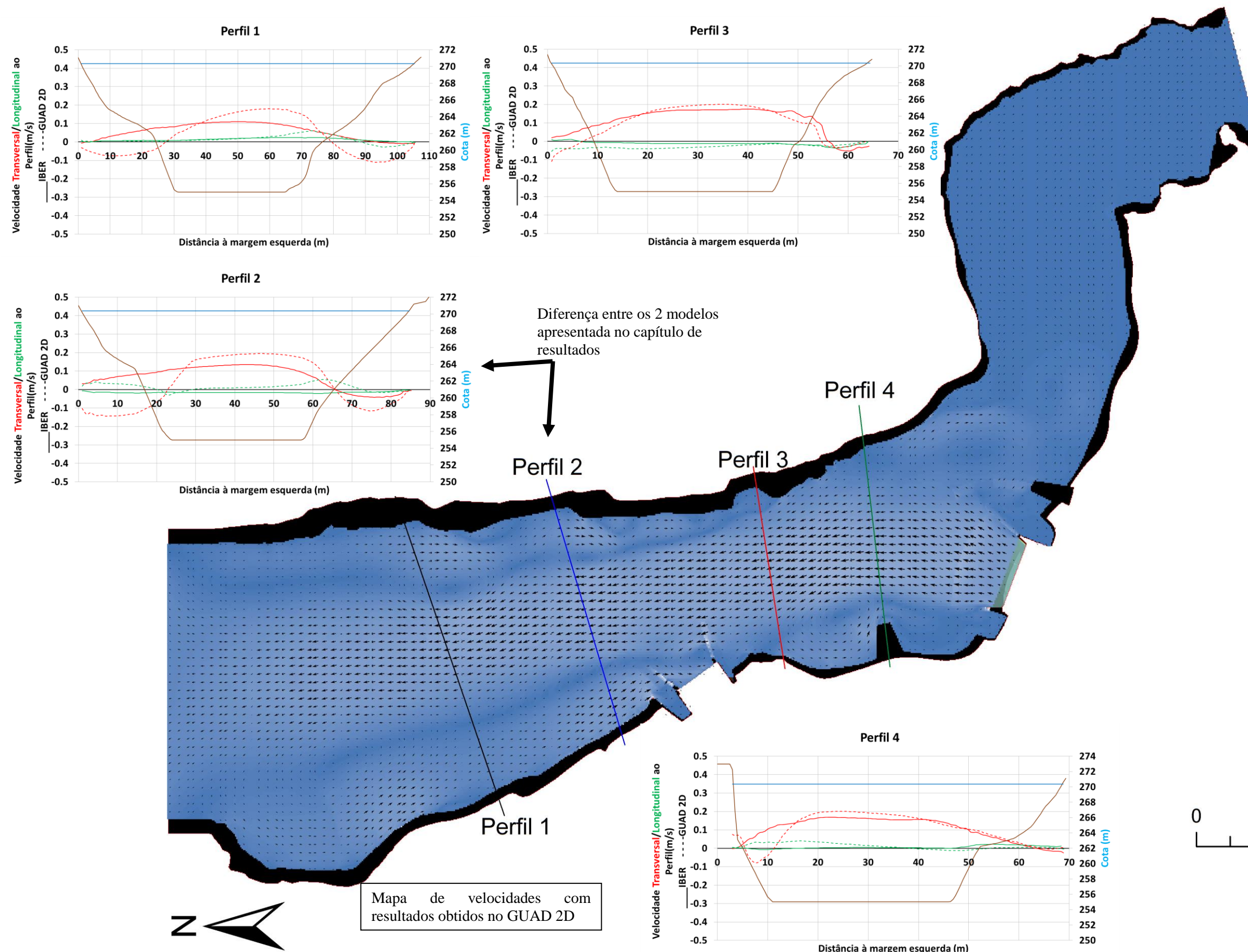








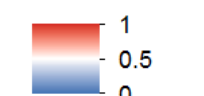




## Apêndice B9

### Legenda

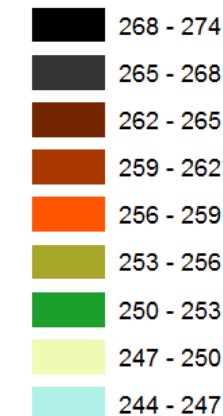
#### Velocidade (m/s)



#### Terreno

— Limite

#### Cota (m)

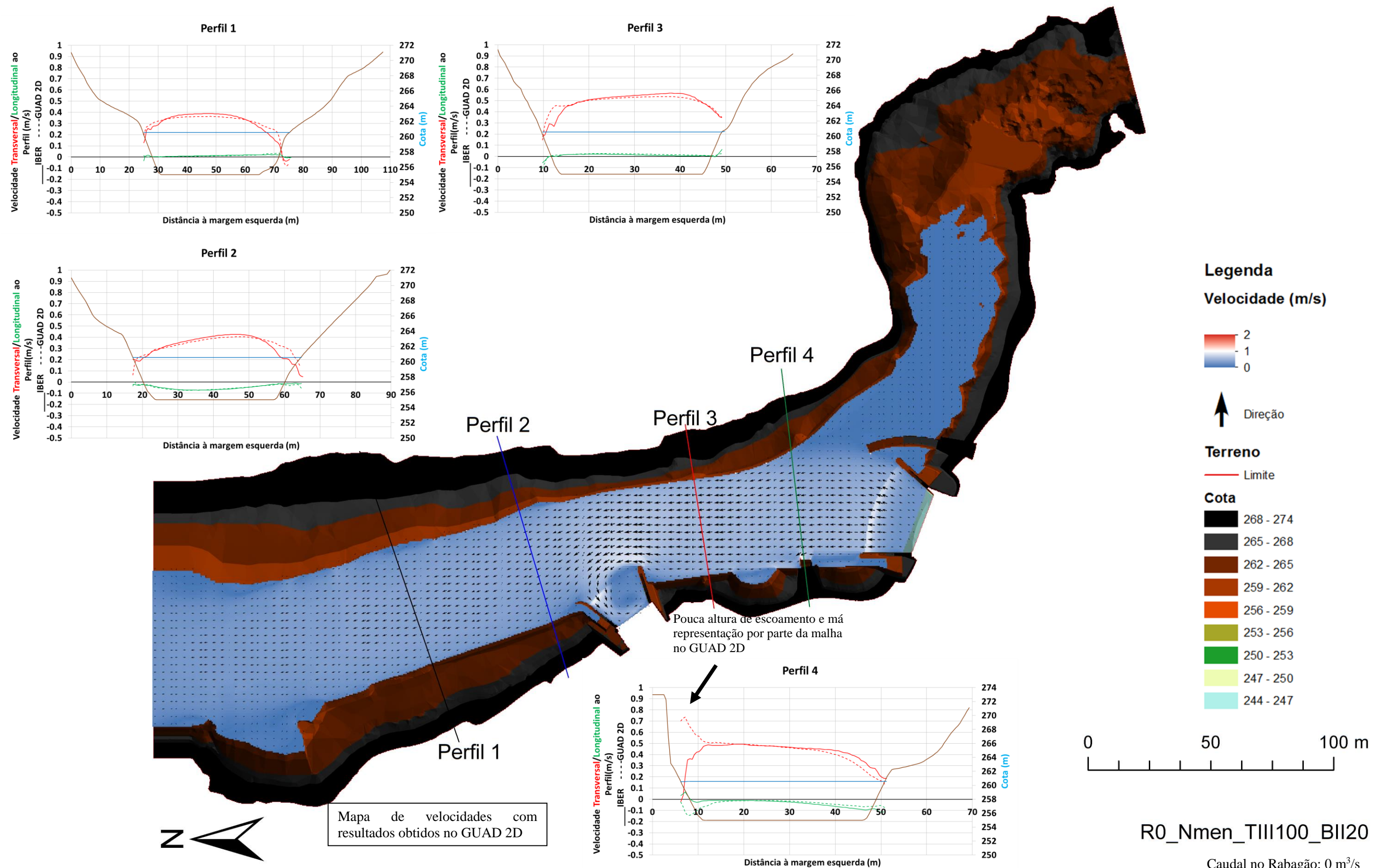


R0\_NPA\_TIII100\_BII20

Caudal no Rabagão: 0 m<sup>3</sup>/s  
Nível da Albufeira: NPA=270.36 m  
Turbinamento em VN III de 100 m<sup>3</sup>/s  
Bombagem em VN II de 20 m<sup>3</sup>/s







R0\_Nmen\_TIII100\_BII20

Caudal no Rabagão: 0 m<sup>3</sup>/s  
 Nível da Albufeira: Nmen=260.56 m  
 Turbinamento em VN III de 100 m<sup>3</sup>/s  
 Bombagem em VN II de 20 m<sup>3</sup>/s